

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra mechanické technologie**

**Analýza technologie tváření ložiskových kroužků**

**Forming Technology Analysis of Bearing Ring**

**Student: Bc. Hana Ptáčková, DiS.**

**Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

**Ostrava 2012**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra mechanické technologie

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Hana Ptáčková**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Analýza technologie tváření ložiskových kroužků**  
**Forming Technology Analysis of Bearing Ring**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor technologií výroby ložiskových kroužků.
2. Návrh variant technologie přesného tváření polotovarů ložiskových kroužků.
3. Numerická analýza navržených variant výrobních technologií.
4. Technicko-ekonomické posouzení navržených variant výroby.

Seznam doporučené odborné literatury:


HENZEL, A., SPITTEL, T. *Rasčet energosilovych parametrov v processach obrabotki metallov davleniem*. Moskva: METALLURGIA, 1982. s. 73  
BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. Ostrava: VŠB, 1979, 137 s.  
PETRUŽELKA, J. aj. *Metoda konečných prvků ve tváření za tepla*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1998, ISBN 80-7078-636-1.  
AVITZUR, B. *Handbook of Metal-Forming Processes*. New York: John Wiley and Sons, 1983  
SEMIATIN, S. L. a kol. *ASM Handbook First Edition. Vol. 14A, Metalworking: Bulk Forming*. Ohio, Metals Park: ASM International, 2005


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011  
Datum odevzdání: 21.05.2012




  
prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě, 21. května 2012



.....

Bc. Ptáčková Hana

Prohlašuji, že

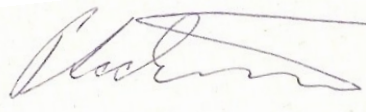
- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odstavce 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě, 21. května 2012

Bc. Hana Ptáčková

Vančurova 15

787 01 Šumperk



.....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Hrubému, CSc. za obětovaný čas a cenné informace, jenž mi poskytnul během zpracování této diplomové práce.

Bc. Hana Ptáčková

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PTÁČKOVÁ, H. *Analýza technologie tváření ložiskových kroužků: diplomová práce.*  
Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní,  
Katedra mechanické technologie, Ústav tváření, 2012, 48 s.  
Vedoucí práce: Hrubý, J

Diplomová práce se zabývá analýzou technologie tváření ložiskových kroužků. V úvodní části je proveden rozbor technologie výroby valivých ložisek a současná technologie výroby ložisek. V další části je realizován matematický model tvářecích operací přechování, tvarování a převrácení ložiskového kroužku pomocí simulačního softwaru QForm. Matematický model, vycházející z metody konečných prvků, byl vytvořen na základě modelu vytvořeného v aplikaci AutoCAD, který byl přenesen do QFormu. Z dosažených výsledků simulace je proveden rozbor simulovaných operací. Závěrečná část práce zhodnocuje dosažené výsledky počítačové simulace programu QForm.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

PTÁČKOVÁ, H. *Forming Technology Analysis of Bearing Ring: Master Thesis.*  
Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of  
Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering  
Technology, Institute of Metal Forming, 2012, 48 pp.  
Thesis head: Hrubý, J.

The master thesis is dealing with forming technology analysis of Bering ring. The first part is an analysis of production technology of bearing rings and current technology of bearings. In the next part is created a mathematical model of upsetting operations, forming and turn bering ring over in the simulation software QForm. The mathematical model, based on the finite element method, was made on the basis of drawing on AutoCAD, which was transferred into program QForm. From results of the simulation the analysis of simulated operations was done. The final part evaluates the results of computer simulation program QForm.

## Obsah

Obsah:	7
Seznam zkratk:	8
Úvod:	10
1 Rozbor technologie výroby ložiskových kroužků	11
1.1 Historie valivých ložisek	11
1.2 Popis valivého ložiska	12
2 Současná technologie výroby ložiskových kroužků	14
2.1 Soustružení	14
2.2 Kalení	14
2.3 Broušení	16
2.4 Superfinišování	17
2.5 Montáž ložisek	18
3 Návrh varianty technologie přesného tváření ložiskových kroužků	19
3.1 Popis ložiskového kroužku a návrh tvaru nástroje	21
3.2 Materiál výkovku	23
3.3 Polotovar výkovku	27
3.4 Materiál pro nástroj	27
3.5 Mazivo	28
3.6 Volba stroje pro zápustkové kování	29
4 Numerická analýza navržené varianty výrobní technologie	31
4.1 Numerické simulace QForm	31
4.2 Analýza výsledků z QFormu	31
4.3 Operace tváření - přechování	32
4.4 Operace tvarování drážky	35
4.5 Operace tváření - stříhání	38
4.6 Operace tváření – převrácení	40
5 Technicko-ekonomické posouzení navržených variant výroby	45
Použité zdroje	47

## Seznam zkratek

Označení	Význam	Jednotka
$A$	tažnost	[%]
$d$	průměr	[mm]
$t$	síla / tloušťka	[mm]
$T$	teplota	[°C]
$Z$	kontrakce	[%]
$R_a$	střední aritmetická úchylka profilu, výškový parametr drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
$Re$	mez kluzu	[MPa]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
HB	tvrdost podle Brinella	–
HRC	tvrdost podle Rockwella	–
$h_0$	počáteční výška při jednoduchém přechování	[m]
$h_1$	konečná výška při jednoduchém přechování	[m]
$k_c$	koefficient bezpečnosti	[-]
$q$	měrné teplo	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	konvenční deformace	[-]
$\lambda$	tepelná vodivost	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\rho$	hustota materiálu	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	přetvárný odpor materiálu	[MPa]
CAD	Computer Aided Design – počítačová podpora konstruování	–
CNC	Computer Numerical Control – číslicové řízení počítačem	–
AutoCAD	software pro 2D a 3D projektování a konstruování (CAD)	–
CKV 630	Označení hornotlakého lisu	–



Označení	Význam	Jednotka
ČSN	označení pro České státní normy	—
DIN	označení pro německé normy	—
EN	označení pro evropské normy	—
FEM	<b>F</b> inite <b>E</b> lement <b>M</b> ethod – metoda konečných prvků	—
MKP	metoda konečných prvků	—
QDraft	<b>Q</b> uick <b>D</b> raft – grafický program určený k přípravě vstupních dat pro simulaci v aplikaci QForm 2D	—
QShape	<b>Q</b> uick <b>S</b> hape – grafický program určený k přípravě vstupních dat pro simulaci v aplikaci QForm 3D	—
QForm	<b>Q</b> uick Metal <b>F</b> orming Simulation – software pro simulace	
(2D/3D)	tváření, 2D/3D (two, three-dimensional) dvojrozměrný, třírozměrný	—

## Úvod

Cílem této diplomové práce je analýza technologie tváření ložiskových kroužků. Tváření je výrobní postup, který dává danému polotovaru tvar tím, že především tlakem tvářecího nástroje přemísťuje jeho části do výsledné polohy. Podstatou tohoto procesu je, že zůstává téměř zachován objem původního polotovaru a výsledného výrobku. Jedná se o objemové tváření za tepla. Tváření za tepla, také označované jako zápusťkové kování. Jedná se o typické řízení tečení kovu dle tvaru použité zápusťky. Do zápusťky složené většinou ze dvou dílů (dolní a horní zápusťky) vkládáme polotovaz zahřátý na kovací teplotu. Horní částí zápusťky je potom polotovaz tvářen pomocí lisu nebo bucharu.

Návrh nové technologie tváření ložiskových kroužků zápusťkovým kovááním proběhne prostřednictvím počítačové simulace. K simulování tvářecího procesu využito programu QForm. Simulační program QForm je dostupný na katedře mechanické technologie. Simulace tvářecích procesů související se zaváděním nových technologií a výrobních postupů do praxe, vede k vysokému zefektivnění výroby ve strojírenství. Jedná se především o využití metody konečných prvků, která je základem simulačních programů používaných v oblasti tváření.

Využívání počítačové simulace technologických procesů může vést ke značným finančním úsporám a to tím, že již před vlastním započatím výroby bude ověřena správnost návrhu.

Diplomová práce je rozdělena do pěti kapitol. V úvodní kapitole je proveden rozbor stávající technologie valivých ložisek s popisem valivých ložisek. Ve druhé kapitole je popsána současná technologie výroby valivých ložisek. Třetí kapitola obsahuje návrh technologie přesného tváření ložiskového kroužku. Jsou zde uvedeny parametry vyráběného ložiskového kroužku, návrh nástroje a volba kovacího stroje. K vytvoření reálné simulace byl použit model vytvořený v aplikaci AutoCAD, který byl přenesen do QFormu. Ve čtvrté kapitole jsou znázorněny výpočetní analýzy počítačové simulace QForm. Celková simulace se skládá ze tří částí - pēchování, tvarování drážky a převrácení vnějšího ložiskového kroužku. Závěrečná pátá kapitola zhodnocuje dosažené výsledky počítačové simulace programu QForm.

# 1 Rozbor technologie výroby ložiskových kroužků

## 1.1 *Historie valivých ložisek*

Historii valivých ložisek můžeme rozložit do několika etap. Ve starém Egyptě byly známe výhody valivého tření. Používali dřevěné kůly k tomu, aby dopravovali balvany z lomů k místu, kde stavěli různé stavby.

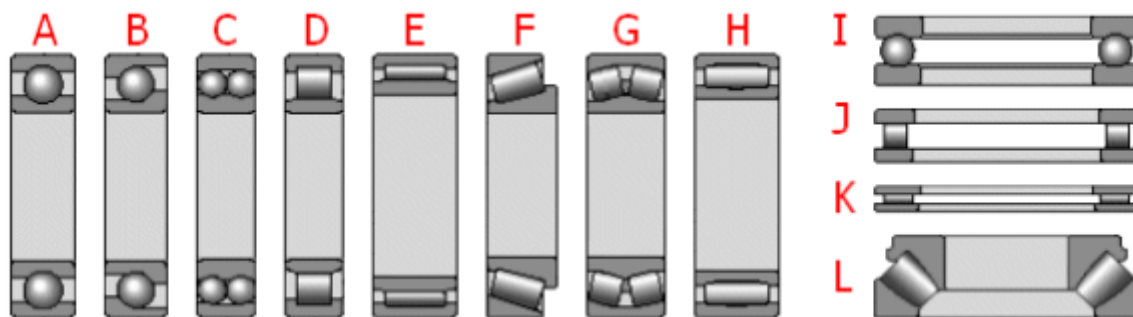
V 15. století Leonardo da Vinci vynalezl první válečkové ložisko. Na konci středověku technici znali výhody valivého tření, ale nebyli je schopni prakticky využít a to proto, že technika na to nebyla ještě vyspělá.

Na přelomu 18. a 19. století se používali koule vyrobené z litiny a bronzu, které se valily ve speciálních žlabech. Tato technika se využívala pro přemístění těžkých věcí na malé vzdálenosti. V roce 1820 bylo patentováno valivé ložisko pro jízdní kola a o 3 roky později byl založen v Evropě první závod na kuličková ložiska.

V dnešní době je valivé ložisko nezbytné ve strojním, automobilovém a jiném průmyslu. Existují spousty druhů valivých ložisek a jejich výroba se neustále zdokonaluje. Na celém světě se vyrábí více než půl milionu valivých ložisek denně. Byla už vyrobená valivá ložiska např. pro 120 000 ot. /min (u vřetena brusky), ložisko s vnějším průměrem 1 mm (do kapesních hodinek) nebo radiální ložisko o průměru 2075 mm (pro soustruh) [1].

## 1.2 Popis valivého ložiska

Ložisko se zpravidla skládá z vnějšího kroužku, vnitřního kroužku a valivých prvků, kterými jsou kuličky, kuželíky, jehličky nebo válečky, které bývají umístěny v tzv. kleci.



A. Kuličková ložiska;

B. Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem;

C. Naklápěcí kuličková ložiska;

D. Válečková ložiska;

E. Jehlová ložiska;

F. Kuželíková ložiska;

G. Soudečková ložiska;

H. Toroidní ložiska;

I. Axiální kuličková ložiska;

J. Axiální válečková ložiska;

K. Axiální jehlová ložiska;

L. Axiální soudečková ložiska.

Obr. 1.1 Základní typy valivých ložisek [3]

Tab. 1.1 Srovnávací tabulka užitečných vlastností valivých ložisek [3].

Typ ložiska		Hodnocení vlastností ložiska													
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Kuličková ložiska	jednořadá	3	3	3	4	1	1	3	1	1	4	4	2	3	5
	dvouřadá	3	3	3	3	3	3	3	2	2	5	5	2	3	5
Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem	jednořadá	3	3	2	4	2	1	3	2	2	4	4	2	5	5
	jednořadá párovaná, dvouřadá	2	3	2	3	3	2	2	3	3	5	5	2	3	5
	se čtyřbodovým stykem	4	2	3	3	2	3	3	3	3	5	5	2	4	5
Naklápací kuličková ložiska		3	4	4	5	1	2	4	2	1	1	1	3	3	5
Válečková ložiska	jednořadá - provedení N, NU, NUB	2	5	5	5	2	2	2	2	2	4	4	5	1	1
	jednořadá - provedení NJ, NF, NUP	2	3	3	5	2	2	2	3	2	4	4	2	3	3
	dvouřadá	1	5	5	3	2	1	1	2	2	5	5	5	1	1
	jednořadá s plným počtem válečků	1	4	3	5	4	3	1	4	4	4	4	3	3	3
	dvouřadá s plným počtem válečků	1	4	3	3	4	3	1	4	4	5	5	3	3	3
Jehlová ložiska		2	5	5	5	3	3	2	3	4	5	5	5	1	1
Kuzelíková ložiska	samostatná ložiska	2	2	1	4	3	3	2	3	3	4	4	1	5	5
	ložiskový pár	1	2	1	3	3	3	1	3	3	4	5	1	4	5
Soudečková ložiska		1	3	1	5	3	3	2	3	3	1	1	2	3	5
Toroidní ložiska	s klecí	1	5	5	5	3	3	2	3	3	1	1	5	1	1
	s plným počtem valivých elementů	1	5	5	5	4	3	1	3	3	1	1	5	1	1
Axiální kuličková ložiska	s rovnou dosedací plochou	5	3	5	5	4	2	3	4	3	4	5	2	5	5
	s kulovou dosedací plochou	5	3	5	5	4	3	3	4	3	4	2	2	5	5
Axiální válečková ložiska		5	2	5	5	4	2	2	4	4	5	5	2	5	5
Axiální jehlová ložiska		5	2	5	5	4	3	2	4	4	5	5	2	5	5
Axiální soudečková ložiska		5	1	3	5	4	3	2	4	3	1	1	1	5	5
<b>Hodnocení</b>		<b>1 - vynikající 2 - dobré 3 - vyhovující 4 - špatné 5 - nevhodné</b>													

kde:

A ... čistě radiální zatížení  
B ... čistě axiální zatížení  
C ... kombinované zatížení  
D ... momentové zatížení  
E ... vysoké otáčky

F ... vysoká přesnost chodu  
G ... vysoká tuhost  
H ... nízká hlučnost  
I ... nízké tření  
J ... vyrovnání nesouososti za provozu

K ... vyrovnání výrobních nepřesností  
L ... axiálně vodící ložiska  
M ... axiálně volná ložiska  
N ... axiální posun v ložisku

## 2 Současná technologie výroby ložiskových kroužků.

Výroba kroužků prochází těmito výrobními kroky: soustružení, dokončovací operace za měkka, kalení a broušení. Operace montáž je dokončením celé sestavy ložiska.

### 2.1 Soustružení

Pro výrobu ložiskových kroužků se používají nejčastěji polotovary (trubky, výkovky). Soustružení představuje dominantní operaci tzv. třískového obrábění ložiskových kroužků. Provádí se na CNC soustruzích, na nichž se z bezešvých trubek nebo tyčí vysoustruží komponenty požadovaných tvarů a rozměrů. Vysoustružený polotovar je připraven pro následující tepelné zpracování, broušení a dokončovací operace.



*Obr. 2.1 Soustruh CNC*

Doplňkovými metodami obrábění je frézování, protahování, dokončování výrobních detailů a vrtání mazacích otvorů. Mezi nejnovější výrobní metody patří i tzv. soustružení za tvrda, tj. po kalení, kdy obrábíme tvrdý materiál za velmi vysoké teploty.

### 2.2 Kalení

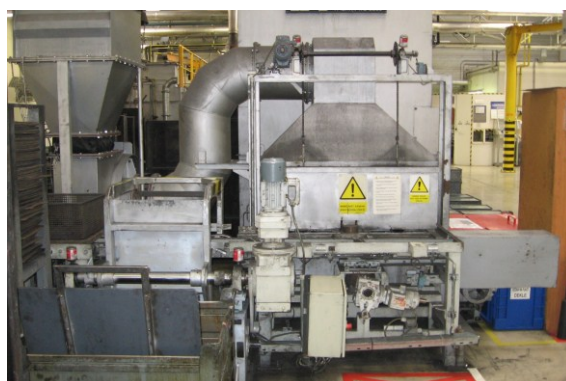
Připravené polotovary ze soustružny se vyperou, usuší a zakalí (tepelně se upraví) v kalící peci. V peci dojde po postupném nahřívání ložiskových kroužků k jejich prudkému ochlazení. Poté se kroužky popouštějí, čímž získají na houževnatosti a stabilitě rozměrů.



*Obr. 2.2 Pohled na kalící linku (vlevo) a vstup do kalící linky (vpravo) [19]*



*Obr. 2.3 Kalení v solné lázni, plynulé ochlazování*



*Obr. 2.4 Popouštění - vstup do popouštěcí linky (vlevo) a vyústění z popouštěcí linky (vpravo) [19]*

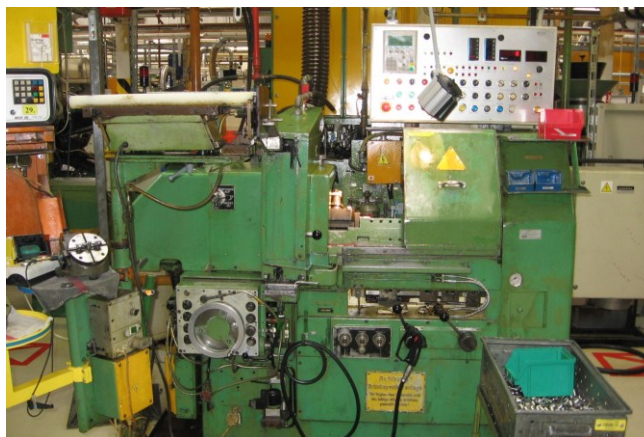


### 2.3 Broušení

V rámci broušení se brousí čelní plochy ložiskových kroužků, vnější průměry, vnitřní průměry, oběžná dráha a opěrná čela. Vše se brousí na speciálních bruskách. Poté kroužky prochází operací honování, tj. přehlazování povrchu, čímž se zlepšuje mikrogeometrie a minimalizuje se tak jeho hlučnost.



*Obr. 2.5 Bruska pro opracování vnějšího průměru[19]*

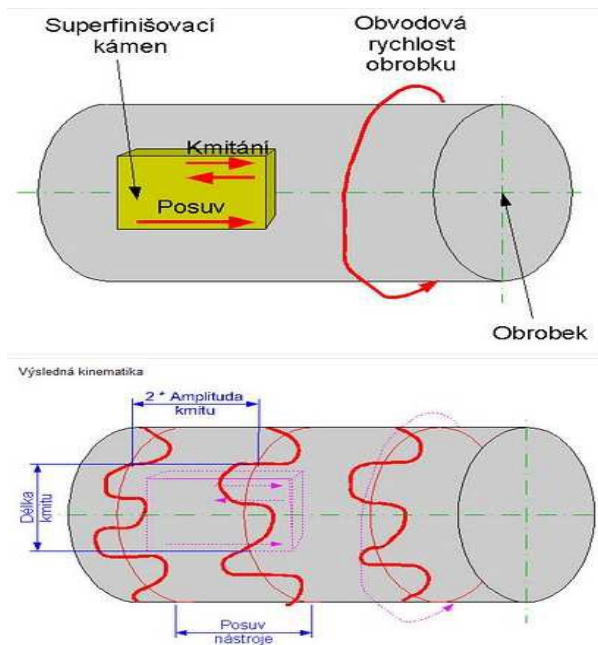


*Obr. 2.6 Bruska pro vnitřní broušení kroužků [19]*



## 2.4 Superfinišování

Metoda superfinišování přesných povrchů je vyvinutá pro požadavky ložiskového průmyslu. Princip opracování rotačních ploch ukazuje obr. 2.7.



Obr. 2.7 Princip superfinišování na vnějším průměru

Polotovary jsou po operacích broušení a honování znečištěny po brusných kamenech. Proto se díly vyperou ve speciálních pracích linkách, kde jsou zbaveny nečistot a jsou nakonzervovány proti korozi.



Obr. 2.8 Honovačka[19]



*Obr. 2.9 Ukázka obrobených dílů [4].*

## **2.5 Montáž ložisek**

Závěrečnou etapou výroby je u vybraných ložisek jejich montáž. V jeden celek se spojí vnější a vnitřní kroužek prostřednictvím ložiskové klece a valivých částí (válečků nebo jehliček). Vše se musí odehrávat ve vysoce čistém pracovním prostředí. Kvalitu výrobků zajišťuje stoprocentní kontrola hlučnosti, kterou smontované ložisko prochází. Smontované ložisko se poté zabalí do přepravek a dopraví k zákazníkovi [2].



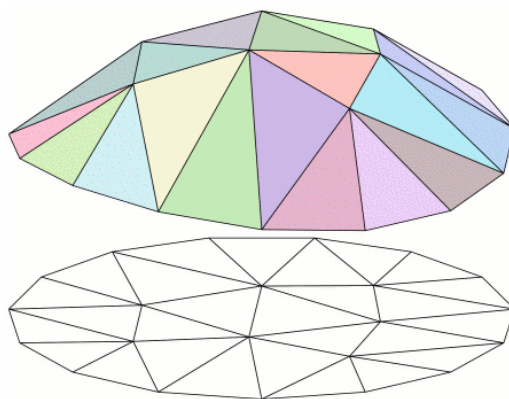
*Obr. 2.10 Robot pro kompletaci ložiska (vlevo) a kontrola hlučnosti ložiska (vpravo)*

### 3 Návrh varianty technologie přesného tváření ložiskových kroužků

Metoda konečných prvků (MKP), nebo také podle anglického originálu Finite Element Method (FEM), je základem mnoha aplikací umožňující numerické simulace. Uplatnění nachází v mnoha vědních oborech jako je fyzika, statika, dynamika, elektrostatika, termomechanika atd. Metoda konečných prvků je založena na řešení problémů soustavou lineárních rovnic. Sestavení rovnic a jejich řešení lze úspěšně provádět pomocí výpočetní techniky. Zpravidla je možné touto metodou řešit problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit [16].

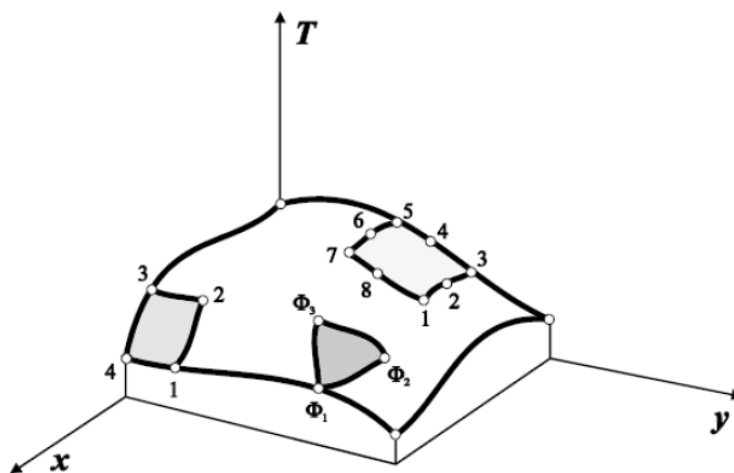
První pokusy aplikace MKP byly zaznamenány na počátku 20. století, kdy byla snaha nahradit těleso soustavou elastických prutů. Poprvé byla tato metoda popsána v roce 1941 (Courant), avšak absence vhodných prostředků, které by dokázaly řešit rozsáhlé soustavy rovnic, zbrzdila její další vývoj. Teprve v roce 1953, kdy byla rovnice tuhosti popsána v maticovém tvaru, mohla být k řešení problému metodou konečných prvků využita výpočetní technika [16].

Dnes existuje celá řada výpočetních systémů k řešení praktických tvářecích úloh, např. univerzální systémy MARC, ANSYS a speciální systémy QFORM, FORGE. Základním principem MKP je diskretizace tělesa na malé části (prvky), které lze matematicky snadno popsat. Prvky můžeme mít rovinné či prostorové (obr. 3.1). V případě rovinného řešení úlohy se jedná o trojúhelníkové, případně čtyřúhelníkové prvky, prostorové řešení počítá například se čtyřstěny nebo kvádry. Volba prvku nemá jasná pravidla, přesnost výsledků závisí nejen na tvaru prvku, ale i na okrajových podmínkách a druhu analýzy. Většinou se vše řídí empiricky. Každý prvek má určitý počet uzlů, prostřednictvím těchto uzlů lze definovat zatížení nebo potlačení stupňů volnosti. Rozdělením tělesa na popsané prvky dostáváme tzv. síť. Hustota vytvořené sítě má vliv na kvalitu výsledků dosažených při výpočtu. Existují algoritmy pro automatické vytvoření sítí. Tyto algoritmy jsou schopné se adaptovat na nové skutečnosti, které vyvstanou během zkoumaného procesu.



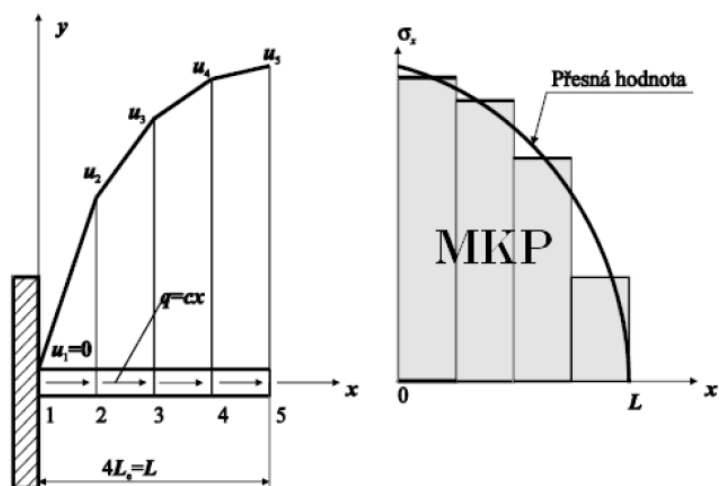
Obr. 3.1 Prostorové a plošné křivky[16].

Fyzikální vlastnosti tělesa, posunutí, teplota atd., které jsou charakteristické pro daný prvek, nahrazujeme funkcí prostorových souřadnic. Jedná se o tzv. aproximační funkci nebo také funkci tvaru (obr. 3.2). Funkce neznámé veličiny je nahrazena v jednotlivých uzlech aproximační funkcí, ta obsahuje právě tolik členů, kolik má prvek uzlů. Pro čtyřúhelníkový prvek tak vznikne například polynom čtvrtého stupně. Obecně platí, že s rostoucím počtem uzlů prvku roste přesnost aproximační funkce, tedy i přesnost celého výpočtu [11,16,17].



Obr. 3.2 Rozložení funkce teploty na rovinné obdélníkové desce [16].

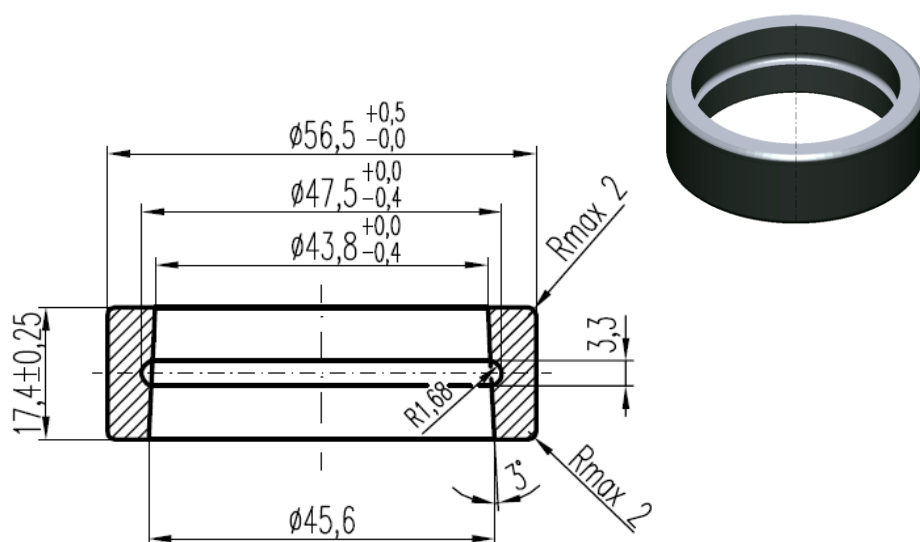
Mezi další základ MKP patří interpolace. Pomocí interpolace zjistíme přibližné hodnoty funkce  $f(x)$  na daném intervalu  $x \in (a, b)$  za pomoci známých hodnot této funkce v jiných bodech intervalu  $a, b$ . Na obr. 3.3 je lineární interpolační pole, které lze s úspěchem použít při dostatečně velkém počtu prvků [16,17].



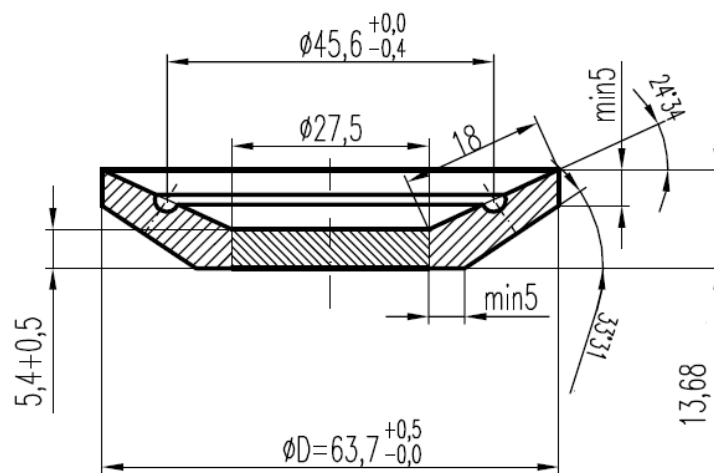
Obr. 3.3 Lineární interpolační pole [16].

### 3.1 Popis ložiskového kroužku a návrh tvaru nástroje

Cílem diplomové práce je analýza technologie tváření ložiskového kroužku. Ložiskový kroužek bude vyroben tvářením. Požadované rozměry ložiskového kroužku jsou uvedeny v obr. č. 3.4 a 3.5. Popis materiálu pro ložiskový kroužek je v následující podkapitole.

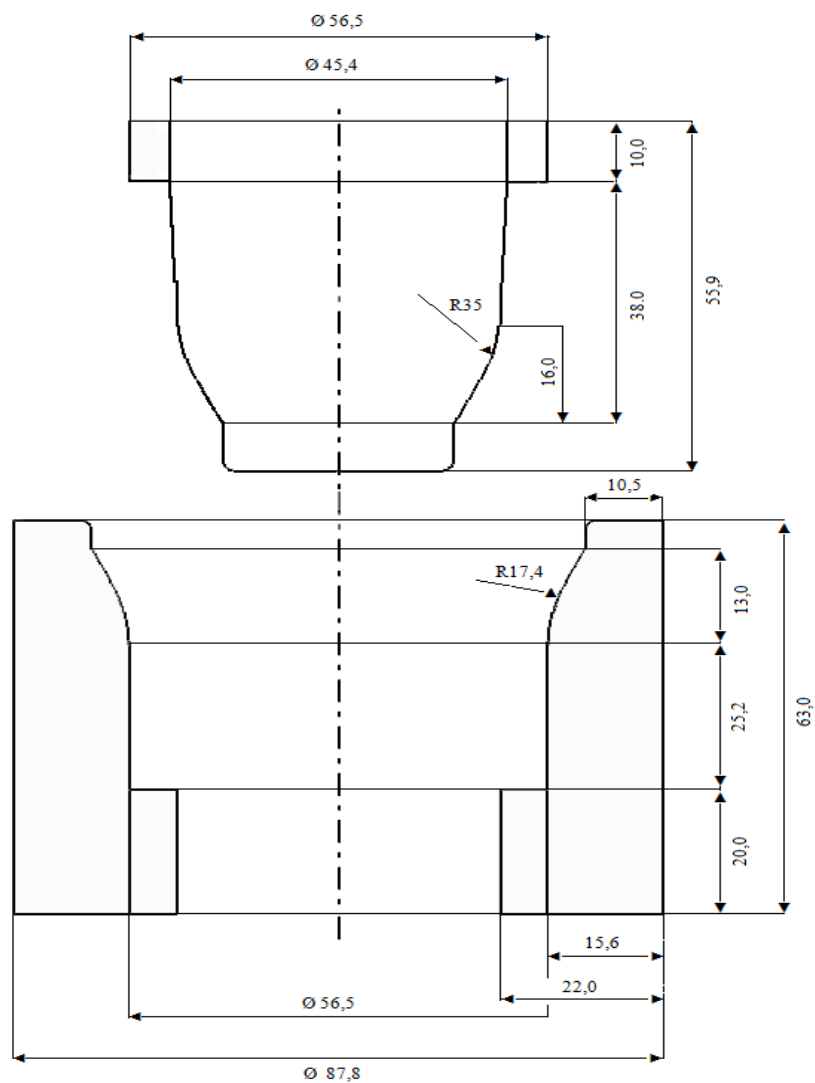


Obr. 3.4 Rozměry ložiskového kroužku v konečné fázi



Obr. 3.5 Rozměry ložiskového kroužku před převrácením

Navrhované parametry nástroje pro tváření ložiskového kroužku ukazuje obr. 3.6. Nástroj se skládá z matrice a trnu. Tvar nástroje je navrhován na základě tvaru a rozměrů ložiskového kroužku. Popis materiálu pro nástroj je popsán v následující kapitole.



Obr. 3.6 Návrh nástroje

### 3.2 Materiál výkovku

Pro výkovek byl zvolen materiál ČSN 14 109 (DIN 1.3505, EN 100Cr6), který musí zajistit požadované mechanické vlastnosti. Tyto oceli jsou legovány chromem, popř. chromem a manganem či křemíkem a hliníkem. Jsou to nejvíce používané slitinové oceli, které umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků. Chromové oceli jsou vhodným materiálem na součásti kuličkových a válečkových ložisek. Vhodná pro výrobu ložiskových kuliček do Ø 25 mm, válečků a kuželíků do Ø 18 mm a kroužků valivých ložisek do tloušťky stěny 16 mm. Na oceli 14 109 je kladen velký požadavek, co se týká mikročistoty materiálu [5,6].

Tab. 3.1 Chemické složení oceli 14 109 v [%]

C	Mn	Si	Cr	Ni max	Cu max	P max	S max
0,90 - 1,10	0,30 - 0,50	0,15 - 0,35	1,30 - 1,65	0,3	0,25	0,027	0,030

#### Mechanické vlastnosti oceli 14 109:

Mez pevnosti v tahu:  $R_m = 608 - 726 \text{ Mpa}$

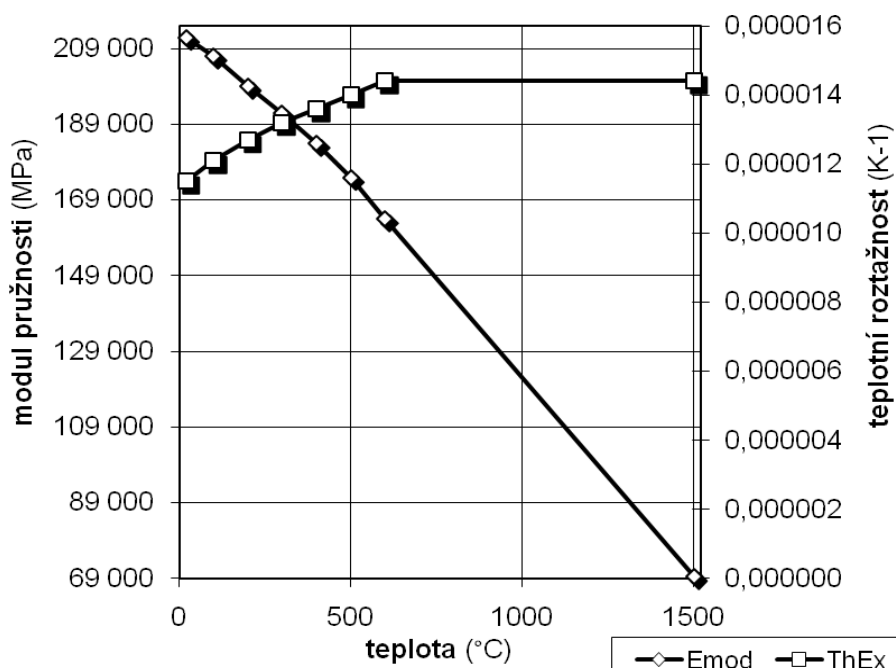
Mez kluzu:  $R_e = 441 \text{ Mpa}$

Tvrdość:  $HB = \text{max. } 210 \text{ Mpa}$

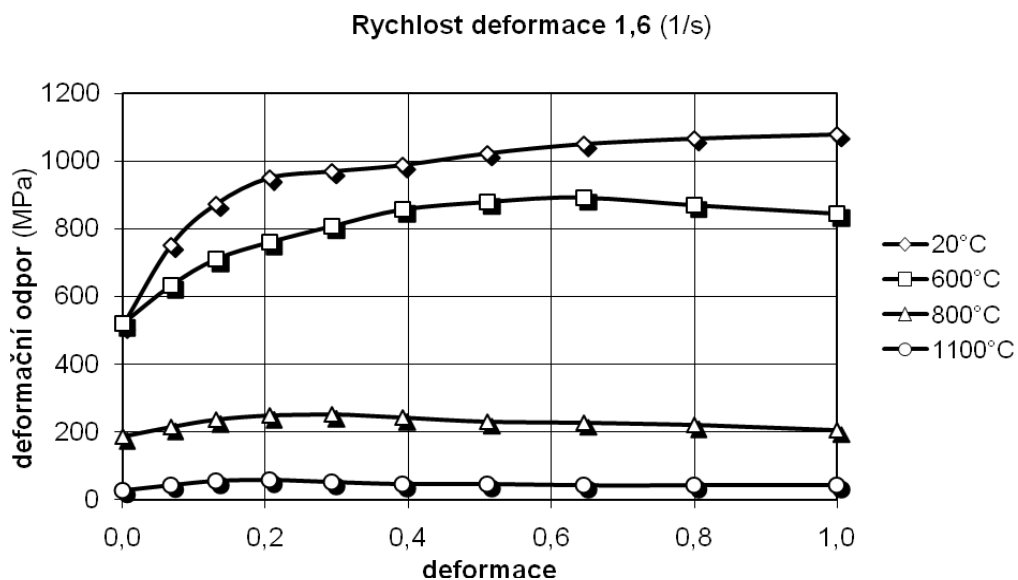
Tažnost:  $A = 18 \%$

Kontrakce:  $Z = 35\% [12]$ .

Následující obrázky znázorňují vlastnosti materiálu 14 109, modul pružnosti a teplotní roztažnosti, deformační odpor a tepelnou vodivost materiálu, obr.3.7 – 3.10.

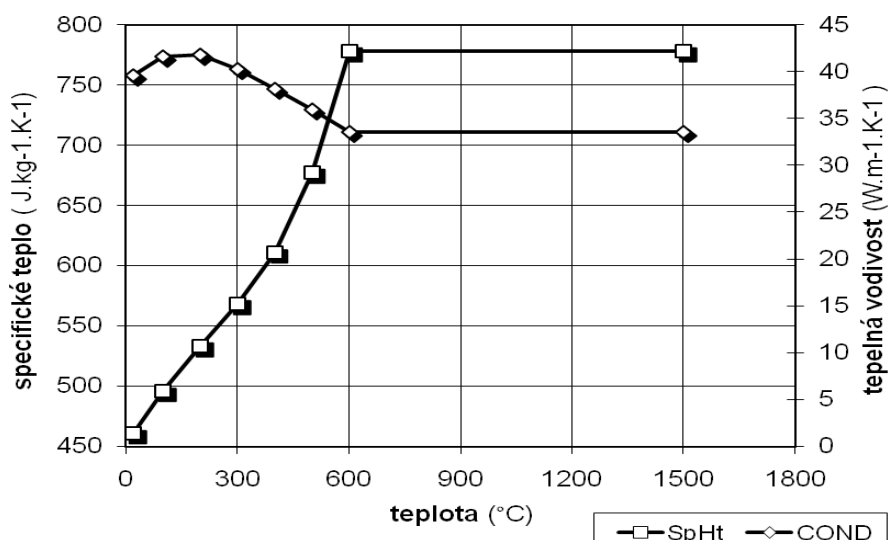


Obr. 3.7 Modul pružnosti a teplotní roztažnosti pro materiál 14 109

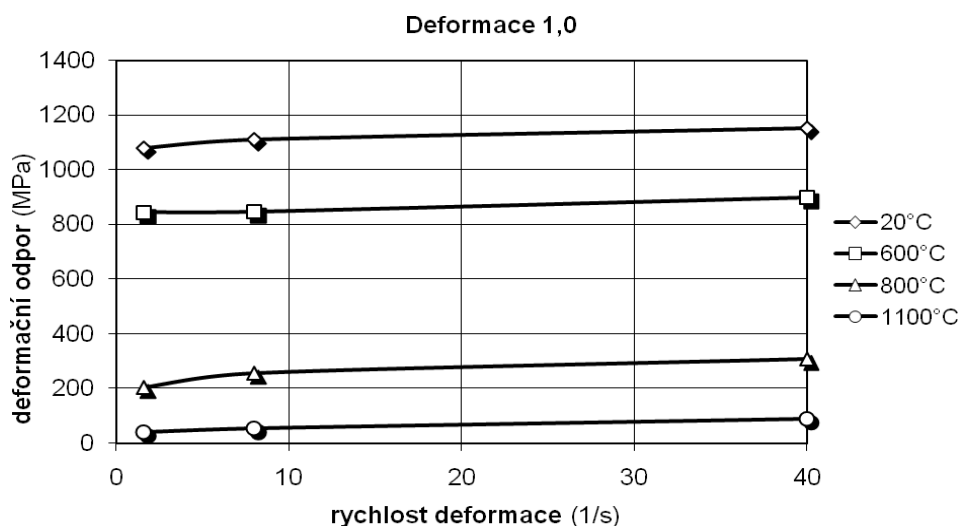


Obr. 3.8 Deformační odpor materiálu 14 109 pro rychlost deformace 1,6 1/s





Obr. 3.9 Specifické teplo a tepelná vodivost materiálu 14 109

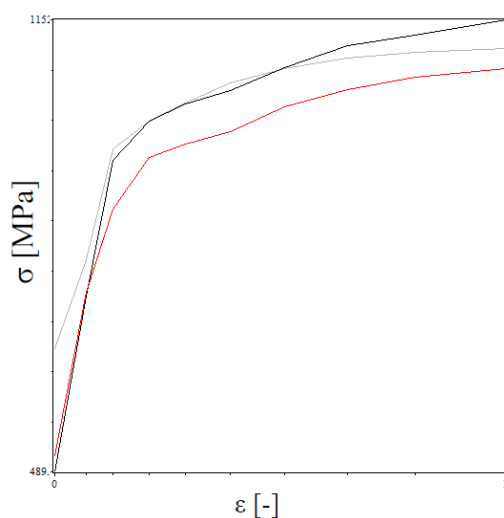


Obr. 3.10 Deformační odpor materiálu 14 109 pro deformaci 1,0

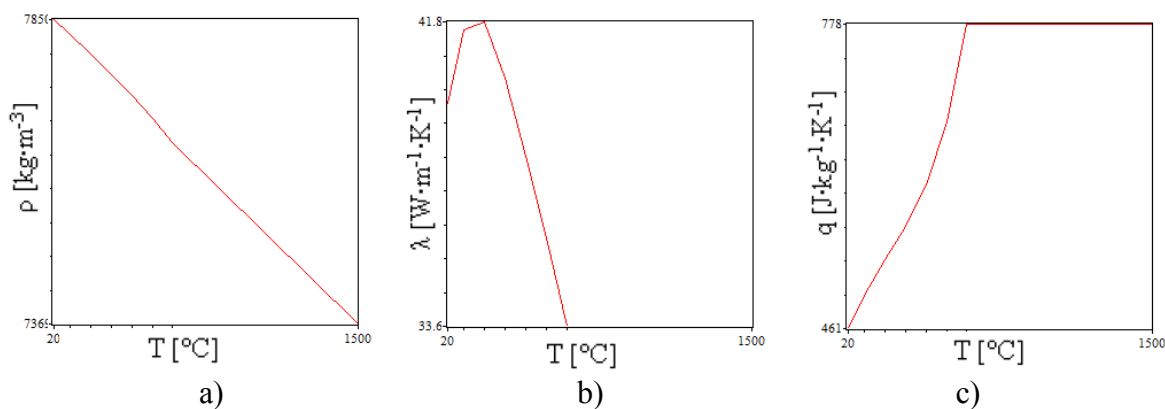
V databázi QForm jsou informace ohledně vlastností deformovaného materiálu následovné. Zahrnují údaje o přetvárném odporu a jiných fyzikálních vlastností, tj. hustota, tepelná vodivost, měrné teplo a teplota tavení. Přetvárný odpor obecně závisí na třech parametrech - deformace, rychlost deformace a teplota, obr. 3.11.

Přetvárný odpor může být závislý na konvenční deformaci, což je  $(h_0 - h_1 / h_0)$  nebo na přirození deformaci  $\ln(h_0 / h_1)$ , kde  $h_0$  je počáteční výška a  $h_1$  je konečná výška při jednoduchém přechování. V některých případech může být přetvárný odpor závislý jen na dvou nebo dokonce na jednom z uvedených parametrů. Přetvárný odpor může být

v databázi materiálů závislý na libovolné kombinaci argumentů. Maximální počet parametrů je tři [9,10].



*Obr. 3.11 Přetvárný odpor materiálu 14 109 jako funkce konvenční deformace, rychlosti deformace a teploty*



*Obr. 3.12 Závislost hustoty (a), tepelné vodivosti (b) a měrného tepla (c) na teplotě pro materiál 14 109*

V databázi QForm můžeme ukládat data přetvárného odporu v tabulkové formě nebo použitím vzorce přetvárného odporu. Přetvárný odpor je v databázi rovněž vyjádřen jako řada křivek, obr. 3.12.

### 3.3 Polotovar výkovku

Rozměr a tvar výchozího polotovaru je dán tvarem výkovku a jeho velikostí. Při volbě polotovarů nás zajímá jeho jakost, druh materiálu, hmotnost, rozměry, tolerance a jakost povrchu. Hmotnost polotovaru, vedle jeho rozdělení dle osy výkovku, výrazně ovlivňuje tok materiálu v předkovací a v dokončovací dutině. Můžeme tak ovlivnit průběh vláken a výsledné mechanické vlastnosti výkovku.

Tvar polotovaru navrhuje obvykle technolog dle vlastních zkušeností a je často omezen sortimentem dodávaného materiálu. Polotovary bývají nejčastěji kované tyče válcované za tepla. Tyče jsou čtvercového, obdélníkového nebo kruhového průřezu. Dalšími polotovary mohou být ocelové bloky, sochory. Používají se i polotovary vyrobené práškovou metalurgií a předlitky [9,10].

V simulačním programu QForm 3D bylo simulováno pěchování polotovaru kruhového průřezu Ø 40 – ČSN 425515, materiál 14 109. Více informací ohledně pěchování jsou uvedeny v kapitole 4.3 *Operace tváření – pěchování*.

### 3.4 Materiál pro nástroj

Na zápusťkový materiál jsou kladeny vysoké požadavky. Mezi nejdůležitější vlastnosti oceli pro zápusťky patří vysoká pevnost za normálních i vyšších teplot, vysoká tvrdost a houževnatost, odolnost proti tepelným rázům, vysoká odolnost proti opotřebení otěrem, dobrá obrobitelnost, snadné tepelné zpracování, odolnost proti vzniku trhlinek při kalení a konečně přijatelná cena oceli. Pro nástroj byl zvolen materiál 19 733 [12].

Tab. 3.2 Chemické složení oceli 19 733 v [%]

C	Mn	Si	Cr	W	Ni max	P max	S max
0,52 - 0,62	0,15 - 0,40	0,80 - 1,20	0,90 - 1,20	1,70 - 2,20	0,35	0,030	0,035

#### Mechanické vlastnosti oceli 19 733:

Teplota kování: 1050 – 850 °C

Žíhání na měkko: 720 - 750 °C

Žihání ke snížení pnutí:	600 – 920 °C
Kalení:	870 – 920 °C
Popouštění 500 - 600 °C:	48 – 42HRC
Tvrdost:	HB = max. 229 MPa [12].

Nástroje považujeme v aplikaci QForm 3D za pružně-plastická tělesa, která se trakcí dostanou do kontaktu s povrchem polotovaru, a která jsou fixována odpovídajícími okrajovými podmínkami k povrchu podpory [9,10]. Parametry materiálu 19 733 uložené v databázi aplikace QForm 3D jsou uvedeny v tab. 3.3.

*Tab. 3.3 Parametry nástrojových materiálů z databáze QForm pro materiál 19 733*

Youngův modul	[MPa]	217000
Poissonova konstanta	[-]	0,3
Mez kluzu při 250 °C	[MPa]	1800
Zpevnění	[-]	0,028

### 3.5 Mazivo

Maziva mají při tváření materiálů především snížit tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem. Mazivo snižuje otěr nástroje, tím prodlužuje životnost nástroje. Snížením tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem se snižuje deformační odpor, sílu a energii potřebnou pro danou tvářecí operaci. Mezi třením a otěrem povrchu nástroje není žádná zákonitost, a proto se při snížení tření může otěr i zvýšit. Důležitý je také chladicí účinek a tepelná izolace maziva. Mazivo snižuje teplotu nástroje buď přímým ochlazením, nebo svými tepelně-izolačními vlastnostmi.

Souvislá vrstva mazadla brzdí přechod tepla z tvářeného materiálu do nástroje. Zároveň chladicí účinek maziva ovlivňuje tok kovu a zabraňuje nalepování kovu na nástroj. Mazivo se nesmí rozkládat vlivem provozních teplot a tlaků a musí si podržet v širokém tepelném rozmezí malou a stálou viskozitu. Zůstanou-li například během kování v dutině zápustky

tuhé zbytky maziva, mohou zabránit dokování nebo jsou zakovány do výkovku. Jako mazivo se používá grafit s vazelínou. Je to tuhé mazivo dispergované v kapalině, která se na povrchu teplého nástroje odpaří a tak se vytvoří souvislý mazací film tuhého maziva. Mazivo se nanese rozprašováním [9,10].

*Tab. 3.4 Parametry použitého maziva z databáze QForm 3D*

Označení v databázi QForm 3D	-	qw-st-h
Třecí faktor	[-]	0,4
Efektivní koef. přenosu tepla	[W/m <sup>2</sup> .K]	3000
Skutečný koef. přenosu tepla	[W/m <sup>2</sup> .K]	30000

### **3.6 Volba stroje pro zápusťkové kování**

Pro kování vnějšího ložiskového kroužku byl použit hornotlaký lis řady CKV 630.

Klasické hornotlaké čtyřsloupové kovací lisy řady CKV nacházejí uplatnění v kovárnách pro volné kování. Jsou určeny pro veškeré operace volného kování výkovků z ocelí i nezelezných kovů jako je pěstování ingotů, děrování, volné kování různých polotovarů s kruhovým i n-hranným průřezem a kování kroužků a dutých válců na trnu. Jsou vhodné do provozů, kde je požadován mělký základ, který umožňuje postavit lis i v místech s vysokou hladinou spodní vody. Lisovní válce tlačí shora na výkovek přes pohyblivou traverzu nesoucí horní kovadlo. Skládaný nepohyblivý rám je tvořen čtyřmi kovanými sloupy, uloženými s předpětím v nábojích horní a spodní traverzy. Lisy mohou kovat s poměrně velkou excentricitou kovací síly. Hydraulické lisy pro volné kování se vyznačují robustní vertikální konstrukcí zajišťující vysokou životnost zařízení. Veškeré pohyby lisu jsou snímány inkrementálními nebo absolutními čidly, jejichž údaje jsou přenášeny do řídicího počítače. Pomocí programového vybavení je možné řídit celý integrovaný kovací soubor.

Při opakovaném zdvihu se již předkovek dále netváří a musí být přenesen do další operace. Tyto lisy jsou vhodné pro přechování a vytlačování materiálu, při kterém dochází k intenzivnímu radiálnímu tečení materiálu.

Nevýhodou kovací lisů je možné zakování okují do povrchu výkovku, případně do dutiny zápustky. Někdy se proto zařazuje jako první operace volné přechování polotovaru, při kterém většina okují odprýská, i když to pro daný výkovek není z technologického hlediska nutné. Odprýskané okuje se z dutiny zápustky vyfouknou [9,10,15].

*Tab. 3.5 Technické parametry kovacího stroje:*

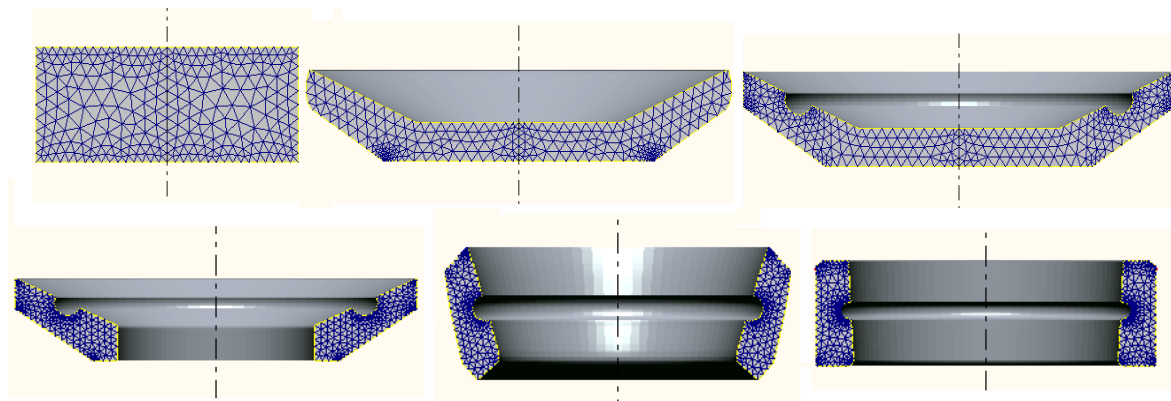
Jmenovitá tvářecí síla	[MN]	6,3
Zpětná síla	[MN]	0,6
Zdvih	[mm]	1000
Maximální otevření	[mm]	2000
Tvářecí rychlost	[mms <sup>-1</sup> ]	120
Počet hladících zdvihů	[min <sup>-1</sup> ]	95-115

## 4 Numerická analýza navržené varianty výrobní technologie

### 4.1 Numerické simulace QForm

Uložený model vytvořený v aplikaci AutoCAD Inventor Professional 10 jsem přenesla do softwaru QForm. Data jsou uložena ve formátu s koncovkou STEP. Model poskytuje cenná data o geometrii analyzované součásti. Geometrická data modelu jsou dosazena do QFormu jako vstupní data.

Po kompletním zadání všech vstupních dat a okrajových podmínek byla numerická simulace spuštěna. Software QForm rozdělí součást na jednotlivé prvky a tzv. zasítuje díl. Vytvořená síť na modelu je znázorněna na obr. 4.1. Hustota jednotlivých mřížek určuje do jisté míry čas výpočtu simulace.



Obr. 4.1 Zasítovaný model

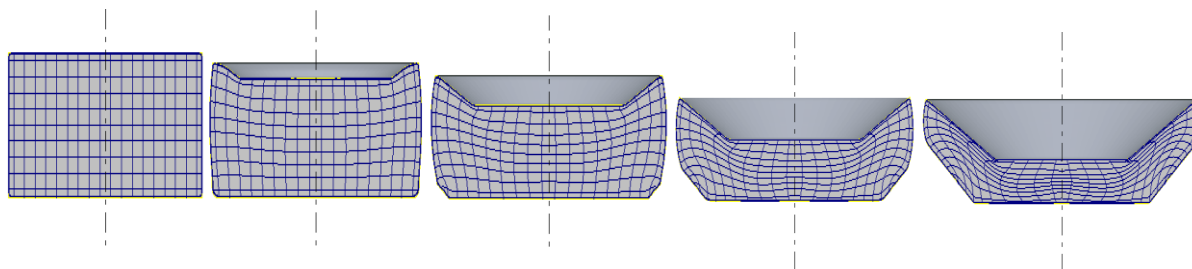
### 4.2 Analýza výsledků z QFormu

Software QForm provedl na základě zadaných vstupních dat několik výpočtů na bázi konečných prvků. Díky QFormu jsme dostali soustavu obrázků s vyznačenými informacemi o teplotě, napětí, deformaci a ostatních hodnotách. Numerické výsledky byly převedeny do grafické podoby. Z grafů si lze dobře udělat představu o namáhání materiálu a průběhu vnitřních napětí při tváření.

V následujícím textu popíši jednotlivé operace. Celková simulace se skládá ze tří částí - přechování, tvarování drážky a převrácení. Mezi operacemi tvarování drážky a převrácením dojde k prostřižení „blány“. Tento stříh v simulaci není znázorněn, a proto proces stříhu je popsán teoreticky.

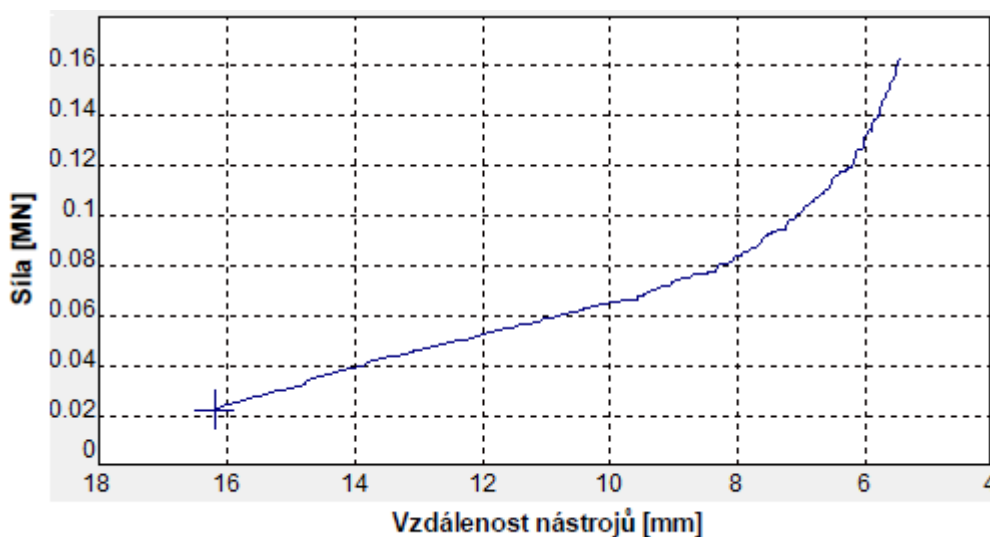
### 4.3 Operace tváření - pēchování

Polotovaru o průměru 40 mm a délce 16,15 mm, který se pēchuje na výšku 5,4 mm, má na vstupu do analýzy teplotu 1050 °C. Celkový čas pēchování je 0,55 s. Změna tvaru polotovaru není komplikovaná, jedná se o klasické pēchování. V tomto případě má konečný stav pēchování miskovitý tvar [9,10].



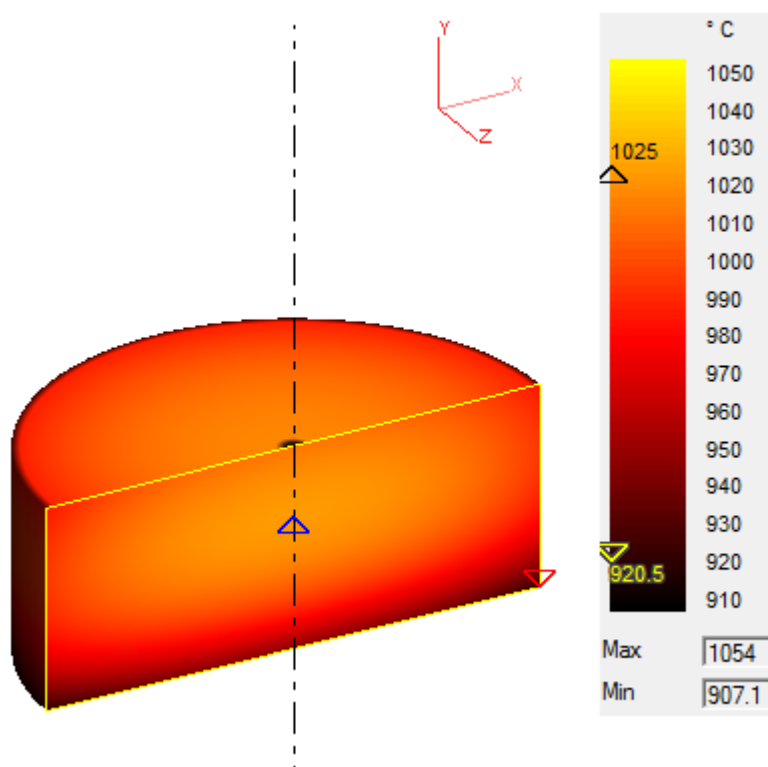
Obr. 4.2 Postupný tok materiálu operace pēchování

Na obrázku 4.3 je zobrazena závislost kovací síly na vzdálenosti nástrojů v průběhu pēchování. Maximální hodnota kovací síly je patrná v grafu.

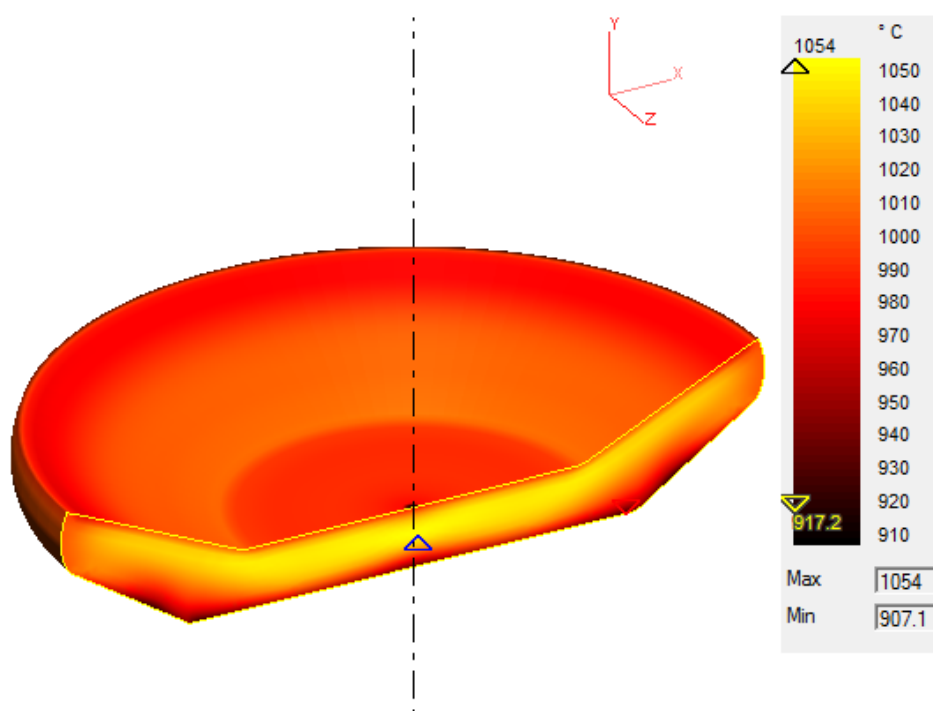


Obr. 4.3 Pracovní digram operace pēchování

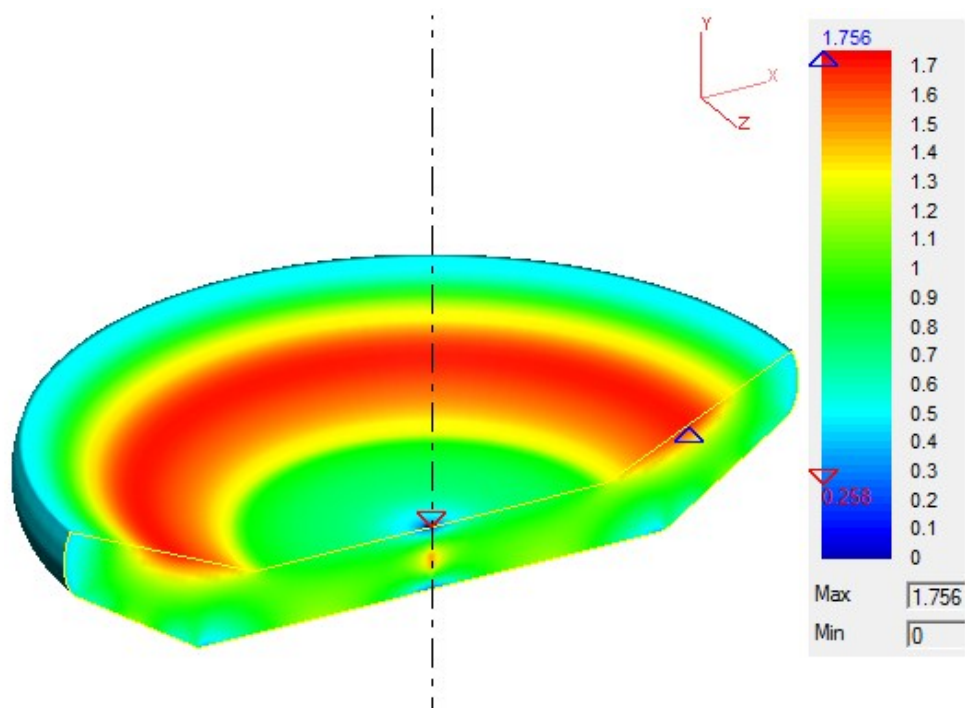




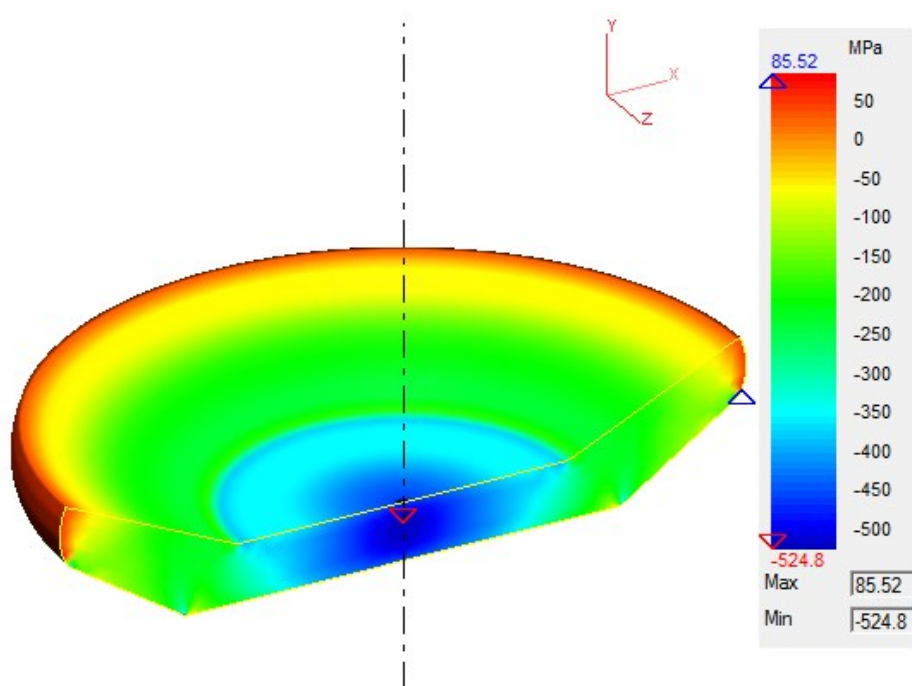
Obr. 4.4 Teplotní pole [°C] špalku před pēchováním



Obr. 4.5 Teplotní pole [°C] špalku na konci operace pēchování



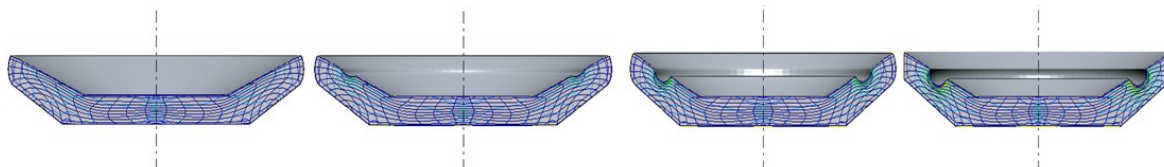
Obr. 4.6 Intenzita deformace [-] operace pēchování



Obr. 4.7 Efektivní napětí [MPa] operace pēchování

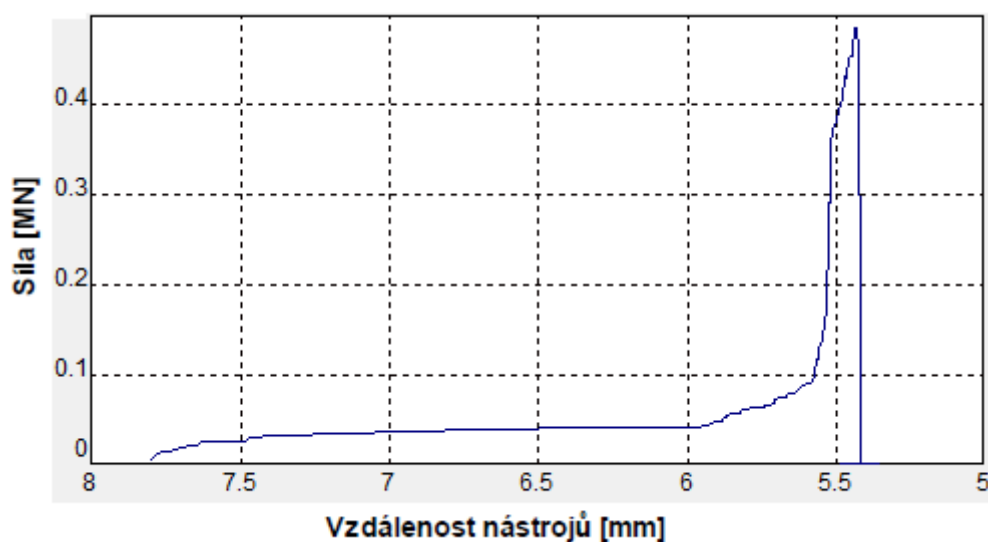
#### 4.4 Operace tvarování drážky

Změna tvaru v operaci tvarování drážky není výrazná. Cílem je vykovat středící drážku, hloubka vytlačené drážky je 2,28 mm, teplota se pohybuje mírně pod 1000 °C. Celkový čas přechování je 0,013 s.

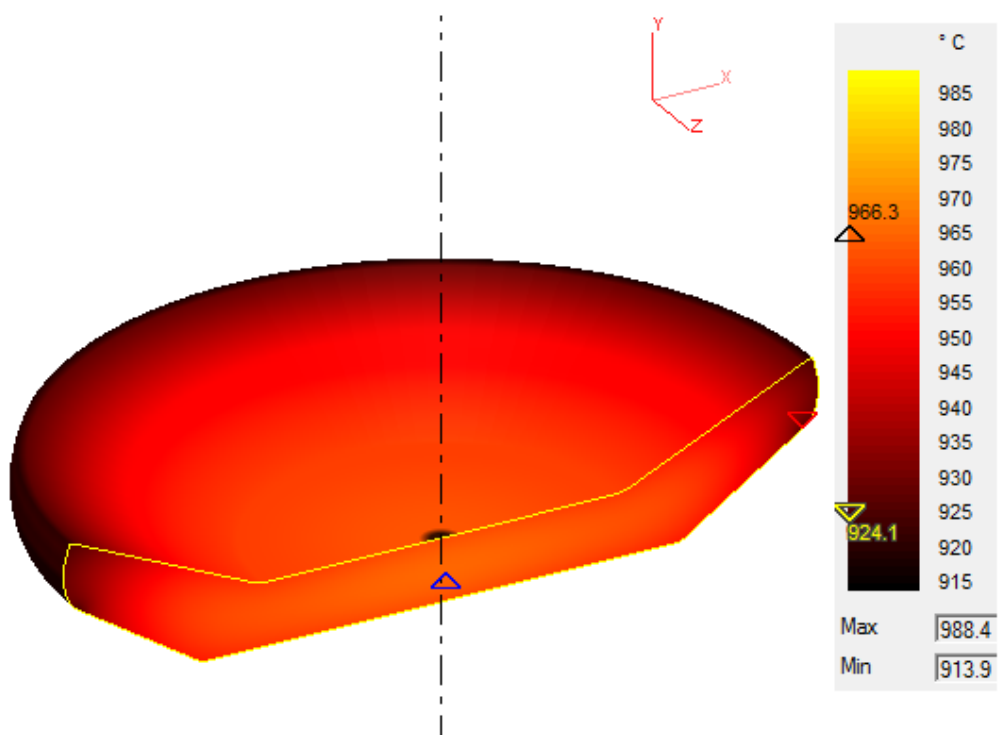


Obr. 4.8 Postupný tok materiálu operace tvarování drážky

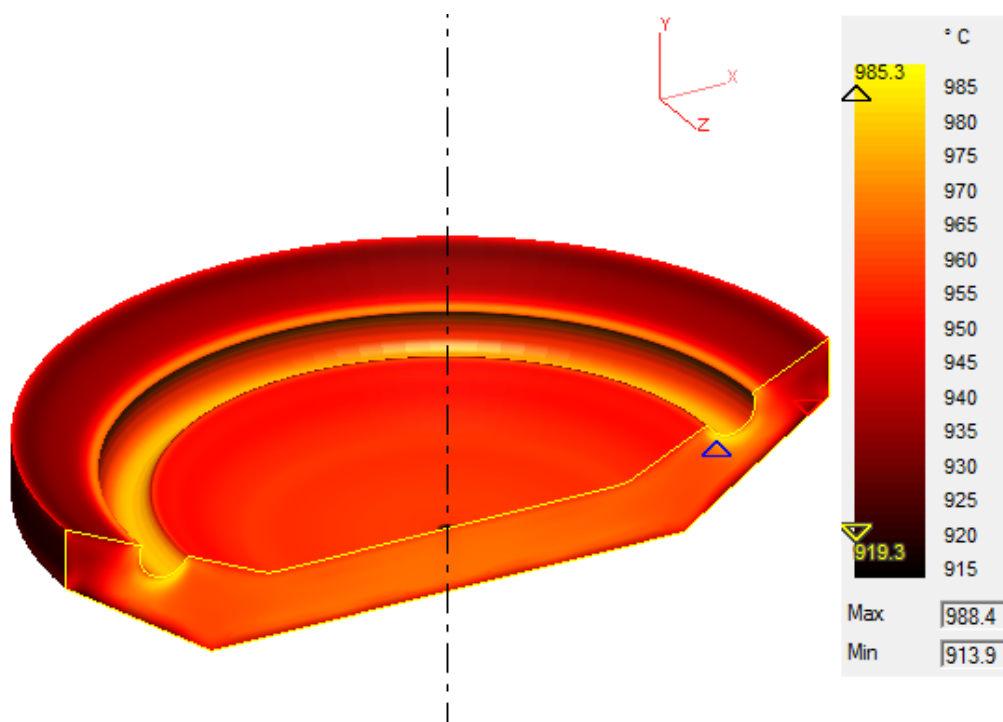
Na obrázku 4.9 je zobrazena závislost kovací síly na vzdálenosti nástrojů v průběhu kování. Maximální hodnota kovací síly je patrná v grafu.



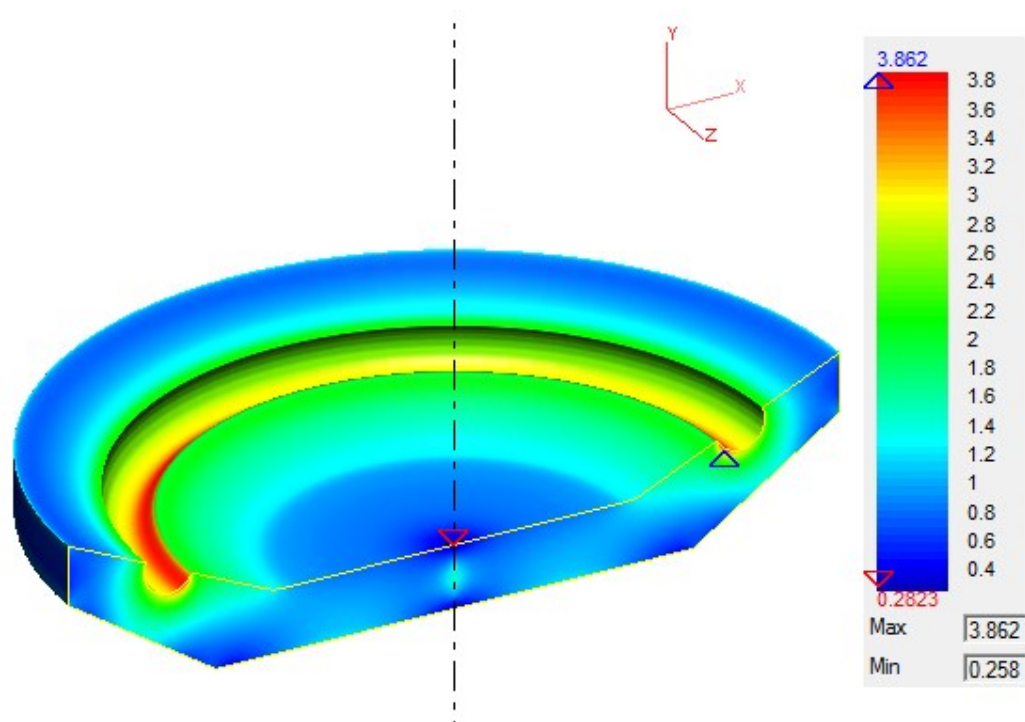
Obr. 4.9 Pracovní diagram operace tvarování drážky



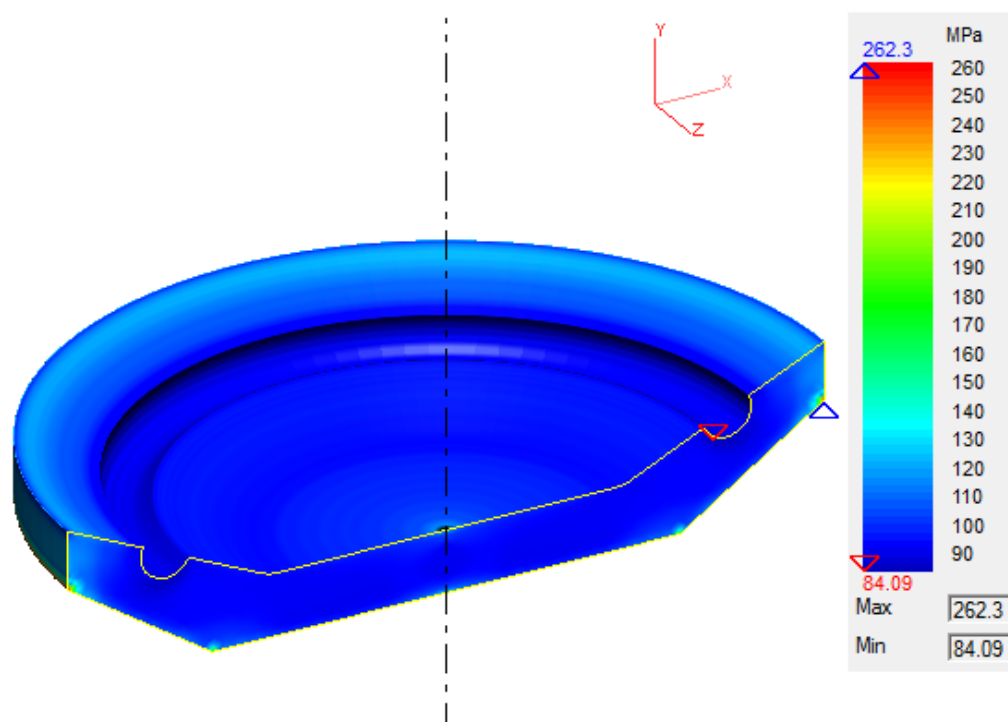
Obr. 4.10 Teplotní pole [ $^{\circ}\text{C}$ ] počátku operace tvarování drážky



Obr. 4.11 Teplotní pole [ $^{\circ}\text{C}$ ] na konci operace tvarování drážky



Obr. 4.12 Intenzita deformace [-] operace tvarování drážky

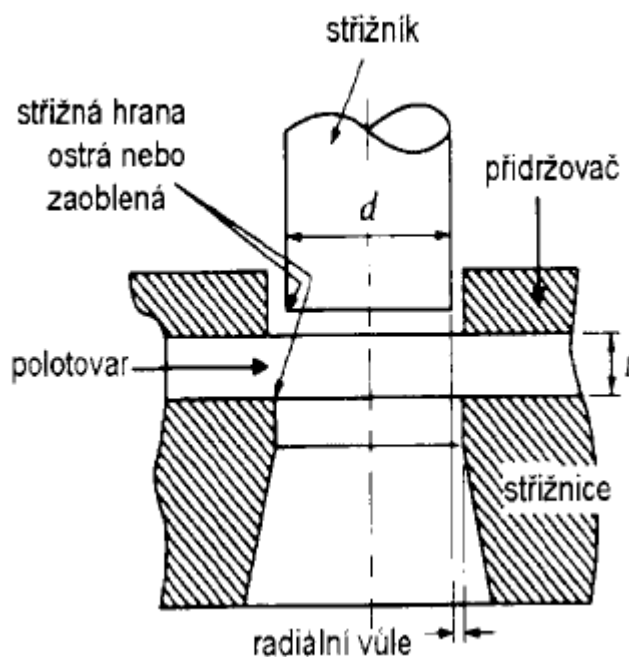


Obr. 4.13 Efektivní napětí [MPa] operace tvarování drážky

#### 4.5 Operace tváření - stříhání

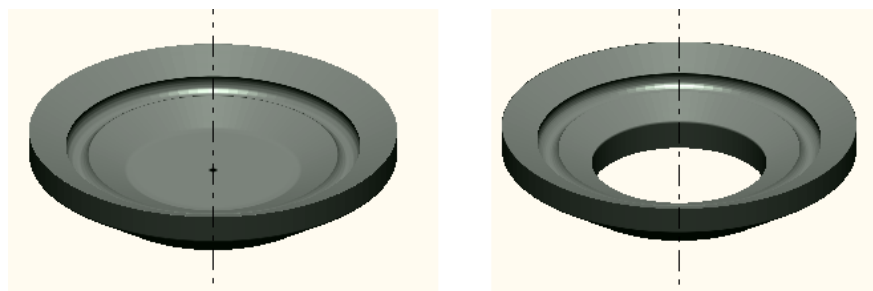
Stříhání je technologický proces, při kterém se materiál odděluje smykovým namáháním, vyvolaným střížnými hranami nástroje. Oddělování se děje současně podél čáry stříhu.

Stříhací operace probíhá mezi párem nožů, z nichž jeden je reprezentován střížnou hranou střížníku a druhý hranou střížnice. Stříhaný materiál, který leží mezi oběma střížnými hranami, je oddělován působením tažné síly, která má vzrůstající tendenci a dosahuje maxima v okamžiku začínajícího oddělování materiálu. V té chvíli střížník vnikne do stříhaného materiálu přibližně  $1/3$  tloušťky. Poté klesá střížná síla rychle k nule. Rychlost poklesu je závislá na stříhaném materiálu, konstrukci střížných hran a odporech působících proti zasunutí výstřížníku do střížnice. Schéma vystřihování ukazuje obrázek č. 4.14 [13, 14].

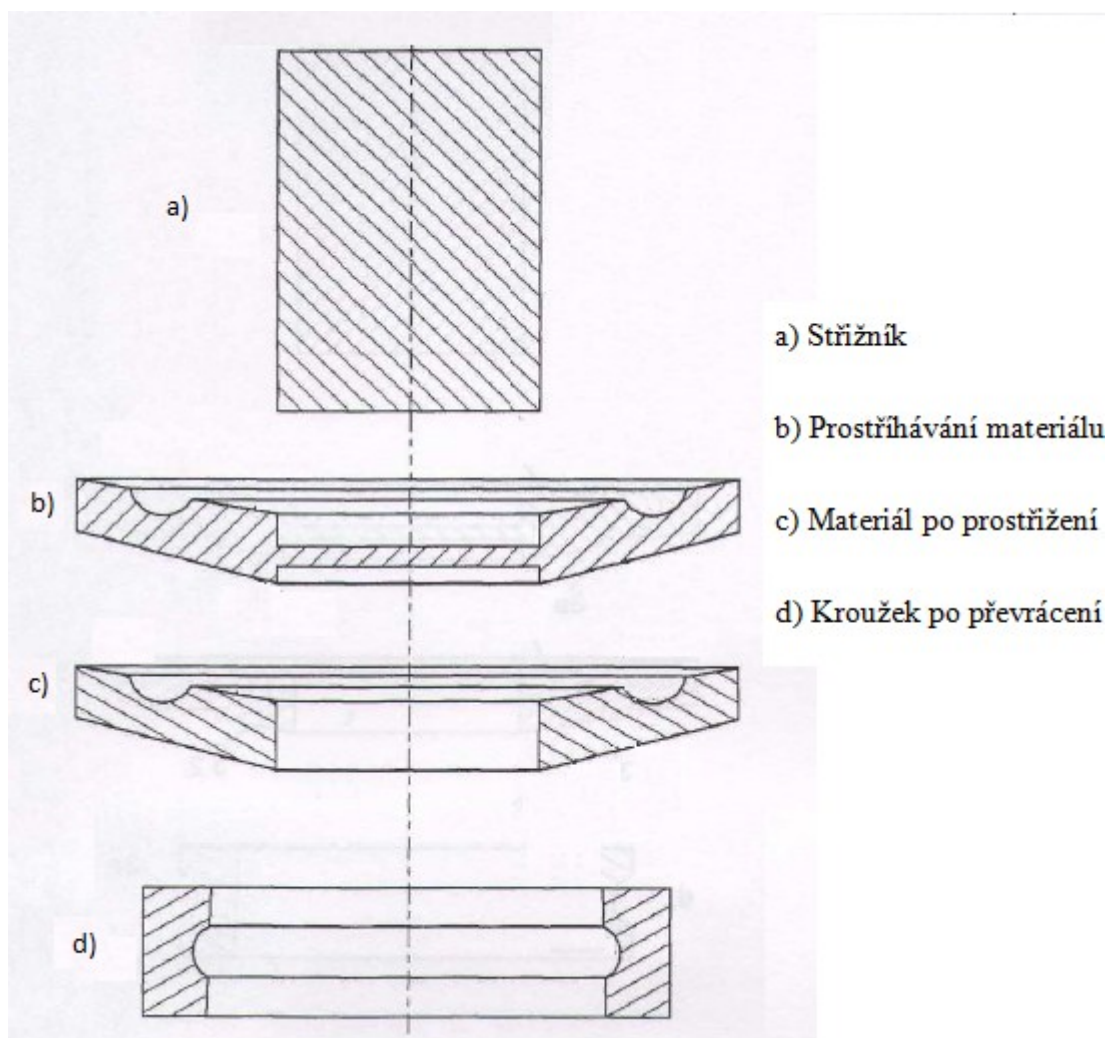


Obr. 4.14 Schéma vystřihování

V simulačním programu QForm nemám k dispozici grafickou simulaci stříhání, proto jej znázorním jednoduchým nákresem, obrázek 4.15.



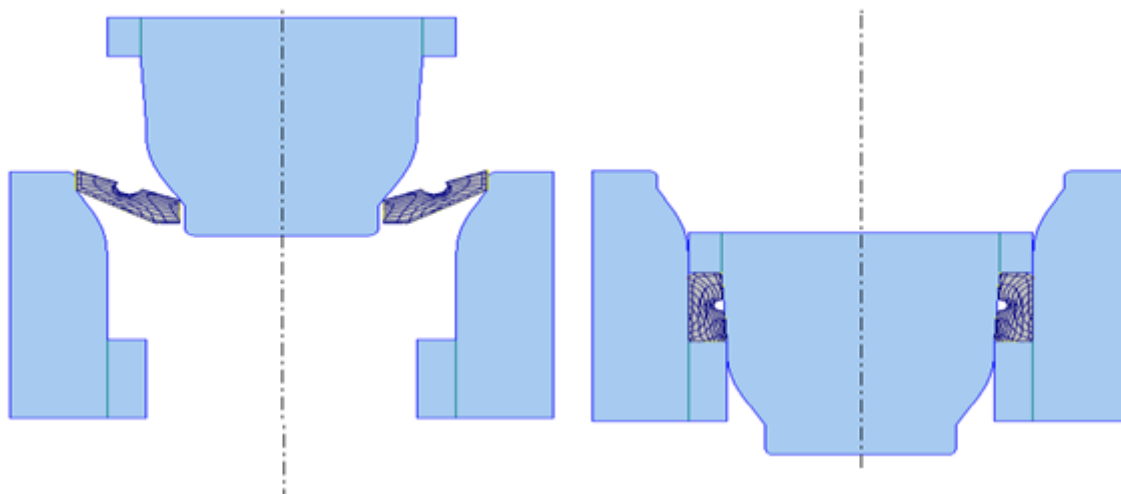
*Obr. 4.15 Polotovár před a po vystřížení*



*Obr. 4.16 Fáze vystřihování ložiskového kroužku*

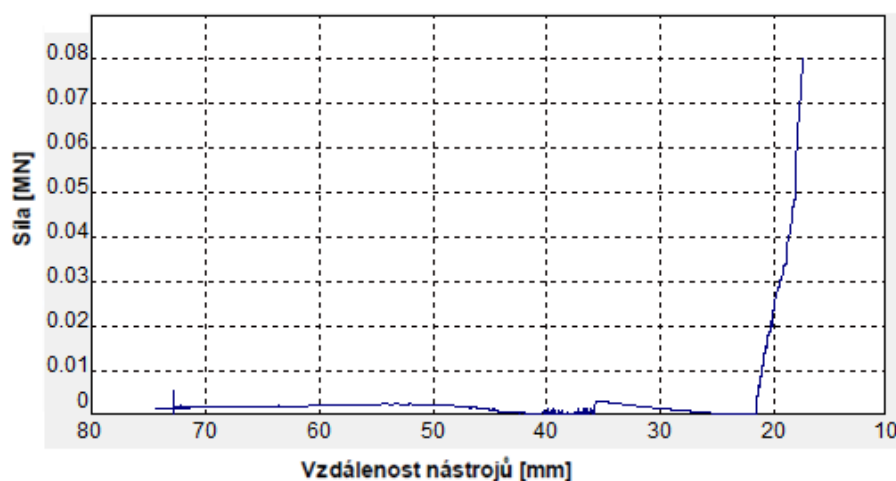
#### 4.6 Operace tváření – převrácení

Po prostřížení střední části se vloží polotovár do matrice a pomocí tlačného trnu bude převrácen. Dolisování na distanc 14,4 mm, celková doba lisování je 3,16 s.



Obr. 4.17 Operace převrácení, počáteční a konečná fáze

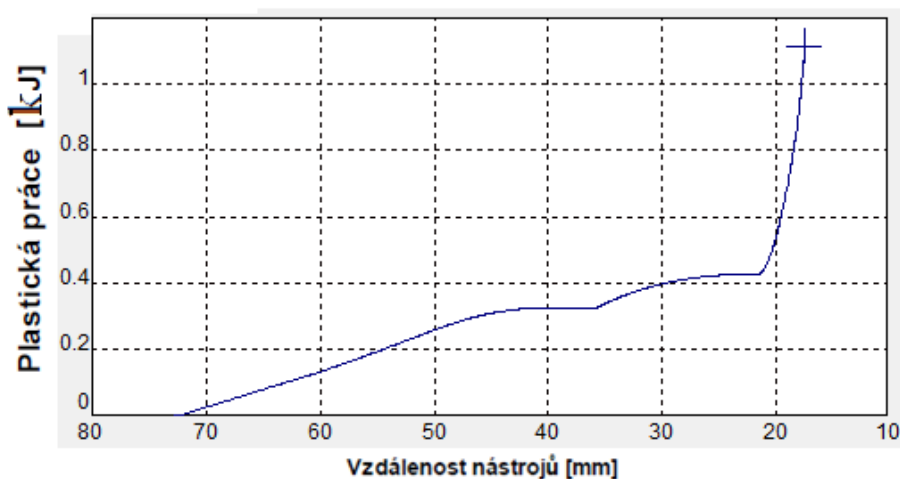
Na obrázku 4.18 je zobrazena závislost kovací síly na vzdálenosti nástrojů v průběhu kování. Maximální hodnota kovací síly je patrná v grafu.



Obr. 4.18 Pracovní diagram operace převrácení



Na obrázku 4.19 je zobrazena závislost plastické práce na vzdálenosti nástrojů v průběhu kování. Maximální hodnota plasticity je patrná v grafu.

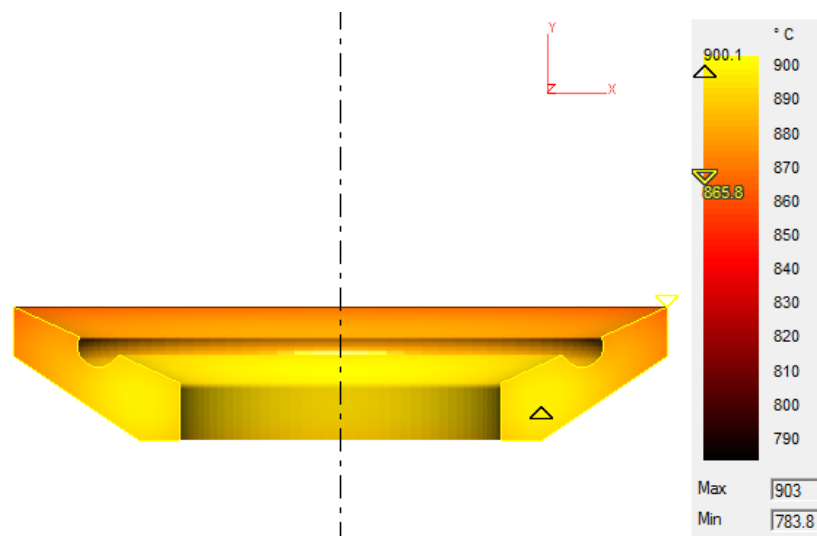


*Obr. 4.19 Průběh plastické práce závislý na vzdálenosti nástrojů*

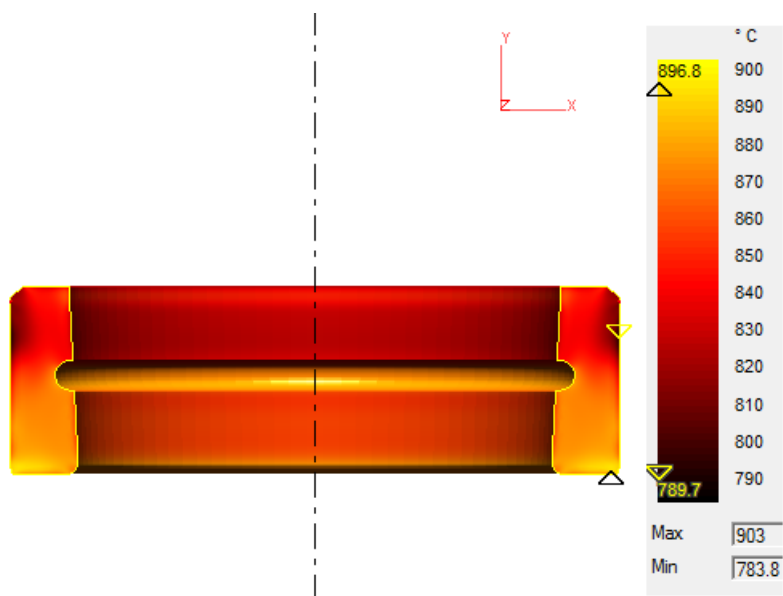
Následné obrázky 4.20 a 4.21 ukazují teplotní průběh na počátku a na konci operace převrácení. Dále obrázky 4.22 a 4.23 zobrazují intenzitu deformace a efektivní napětí [MPa] na konci operace. Maximální a minimální hodnoty vymezují šipky zobrazené na modelu.

Efektivní napětí v nástrojích bylo analyzováno při maximálním zatížení tvářecí silou. V prvním nástroji (Tool 1) dosáhl maximálních hodnot 616,6 MPa, v druhém nástroji (Tool 2) dosáhl o něco vyšších hodnot, a to 712 MPa, viz obr. 4.24. Kritickými místy, kde dochází k největšímu nárůstu efektivního napětí, jsou místa kontaktu s tvářeným kroužkem.

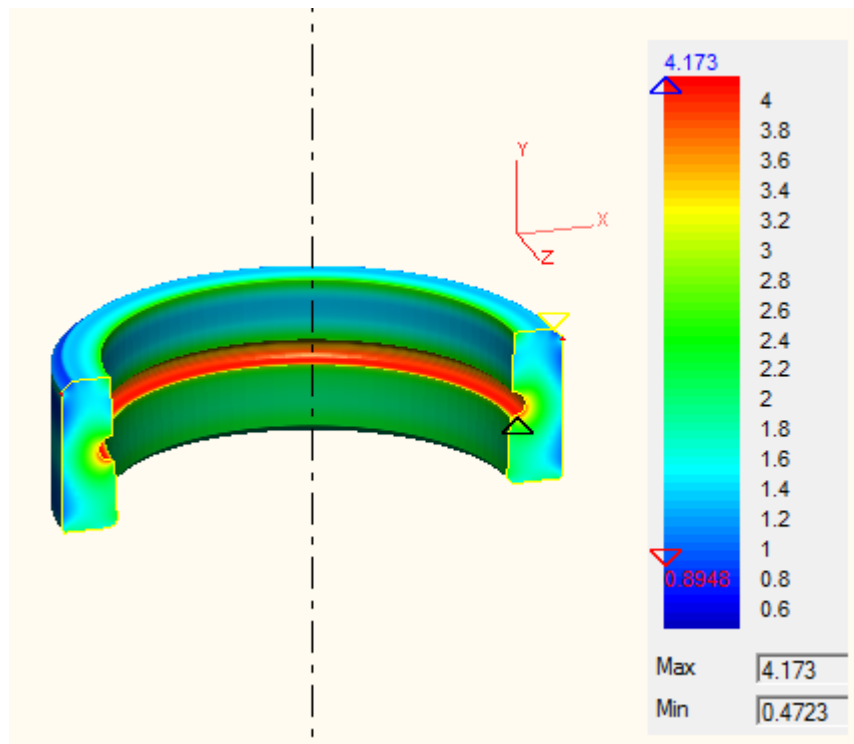
Dalším ukazatelem namáhání nástroje vykresluje obrázek 4.25, který zobrazuje intenzitu deformace na obou nástrojích. Nejvyšší intenzita deformace je také v místech kontaktu s tvářeným kroužkem.



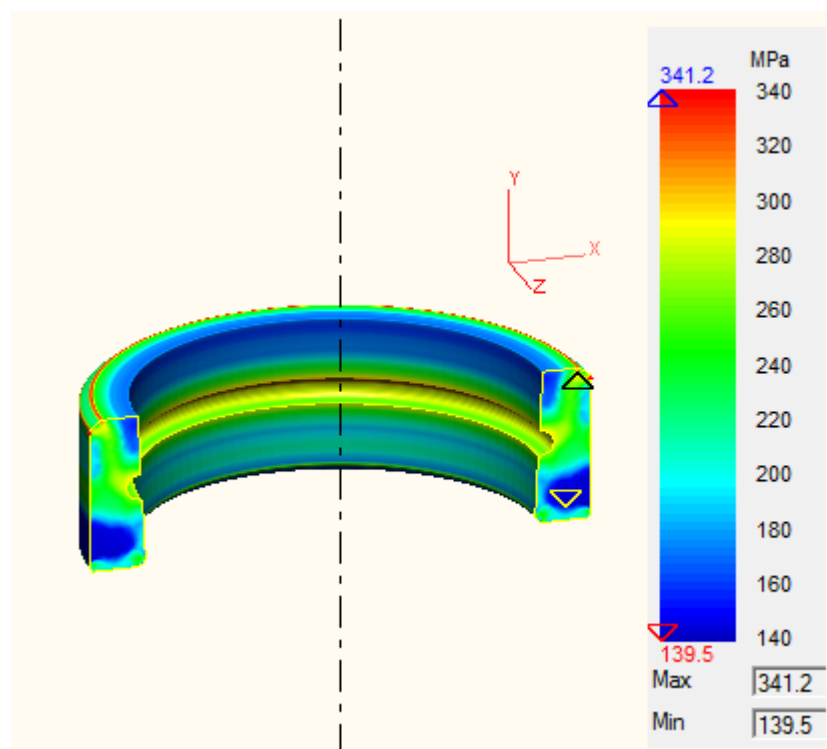
*Obr. 4.20 Teplotní pole [°C] počátku operace převrácení*



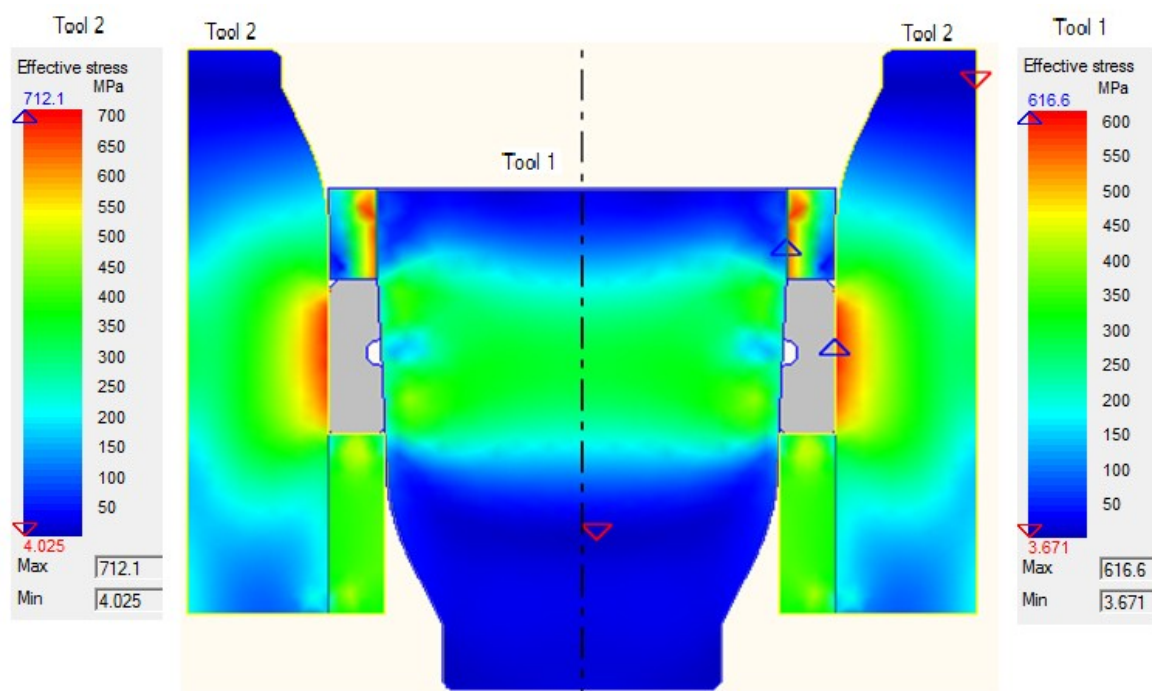
*Obr. 4.21 Teplotní pole [°C] na konci operace převrácení*



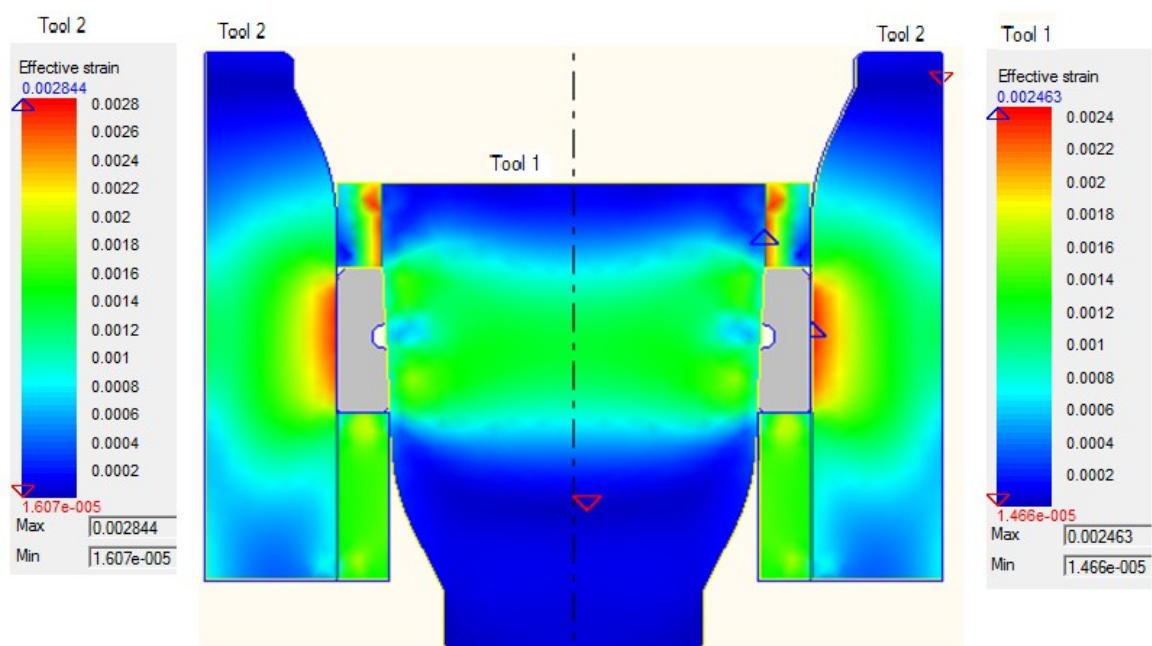
Obr. 4.22 Intenzita deformace [-] operace převrácení



Obr. 4.23 Efektivní napětí [MPa] operace převrácení



Obr. 4.24 Efektivní napětí [MPa] nástrojů



Obr. 4.25 Intenzita deformace [-] nástrojů

## 5 Technicko-ekonomické posouzení navržených variant výroby

Cílem diplomové práce je analýza technologie tváření ložiskového kroužku. Aplikace QForm 3D se ukázala jako účinný nástroj při zkoumání navrhované technologie. Grafické zobrazení vyhodnocovaných veličin názorně ukazuje jejich rozložení na výkovku i nástroji, což bylo důležité pro zpracování celé práce.

Stanovila jsem potřebné parametry procesu tváření vnějšího ložiskového kroužku, které byly dále využity k návrhu nové technologie výroby. V diplomové práci byly analyzovány operace přechování, tvarování a převrácení. Hlavní pozornost směřovala k operaci převrácení ložiskového kroužku. Z hlediska přípravy vstupních dat simulace byla operace převrácení nejobtížnější.

Operace přechování se ukázala jako bezproblémová, nástrojový materiál má značné pevnostní rezervy. Pro tvarovací nástroj byl doporučen materiál s vyššími mechanickými vlastnostmi. Nástrojový materiál pro celou tvářecí operaci je vyhovující. Výsledné poznatky mohou posloužit pro případnou úpravu technologie tak, aby probíhala efektivně. Obecné závěry mohou být rovněž využity při tváření podobných výrobků.

Z ekonomického hlediska je výroba polotovaru ložiskového kroužku velice nákladná. Celkové náklady na výrobu přesným tvářením „polotovaru“ ložiskového kroužku jsou vyšší než celkové náklady stejného kroužku vyrobeného z trubky. Pořizovací náklady na výrobu nástrojů nejsou také zanedbatelné, taktéž náklady konstruktérské firmy, která bude navrhovat parametry nástrojů a simulovat tvářecí proces.

Vzhledem k vysoké ceně materiálu, vysokých pořizovacích nákladů na nástroj a nákladů na konstrukci, musí být snaha dosáhnout jeho nejvyšších úspor, které mohou výrazně ovlivnit vlastní náklady. Pro podniky zabývající se výrobou ložisek v objemném množství a několikaletého kontraktu na zakázku (min. 500 tis. ks/rok + ca. po dobu 5-ti let), může být technologie přesného tváření ekonomicky zajímavá.

Úsporu nákladů lze nalézt v celém procesu výroby. Pokud budeme vyrábět ložisko z přesného výkovku, odpadají nám některé výrobní operace, jak ukazuje tab. 5.1. Údaje v tabulce ukazují pracnost výrobních operací.

Tab. 5.1 Čas výrobních operací pro ložiska, pracnost

Výrobní oprave	Polotovar	
	Trubka	Přesný výkovek
Soustružení	50%	0%
Kalení	3%	0%
Broušení	40%	55%
Superfinišování	5%	5%
Mytí	2%	2%
	100%	62%

Operace soustružení a operace kalení odpadá úplně. Hlavní úlohou soustružení u ložisek je přesnost tolerance polotovaru a vyrobít kroužek, co nejvíce se blížícím tvarem hotového výrobku. Tvar a rozměry polotovaru ložiskového kroužku jsou zajištěny přesným tvářením. Následovné broušení za tvrda zcela pokryje technologické požadavky ložiska. Nejpřesnější broušení je potřebné na oběžnou dráhu a to 10-20  $\mu\text{m}$ . Vnitřní a vnější část ložiska, označovaná jako nefunkční plocha, mají volnější toleranci přesnosti a pohybuje se mezi 50-60  $\mu\text{m}$ , šířka kroužku má orientační toleranci mezi 100-120  $\mu\text{m}$ .

Operace kalení není již nutná. Během kalení probíhá specifické tepelné zpracování, které už proběhne během tvářením ložiskového kroužku.

Počet odpracovaných hodin není však jediným ukazatelem. Vysoké investiční náklady, které se formou odpisů odráží do režie, převyšují. Jak uvádím výše, nová technologie bude zajímavá pro objemné roční zakázky delšího časového trvání (min. 5 let).

Celková úspora výroby ložisek spočívá ve srovnání těchto vysokých investičních nákladů na výrobu výkovků s výrobními náklady pro výrobu ložisek z polotovaru trubky.

## Použité zdroje

- [1] WIKIPEDIA. *Valivé ložisko* [online], cit. [2012-04-09] <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Valivé\\_ložisko](http://cs.wikipedia.org/wiki/Valivé_ložisko)>.
- [2] KOYO BEARINGS ČR. *Domovské stránky* [online], cit. [2012-04-09] <<http://www.koyobearings.cz/index.php/technologie>>.
- [3] MITCALC. *Domovské stránky*, [www.mitcalc.com](http://www.mitcalc.com) [online], cit. [2012-04-09] <[http://www.mitcalc.com/doc/help/cz/c\\_bearing\\_choice.htm](http://www.mitcalc.com/doc/help/cz/c_bearing_choice.htm)>.
- [4] ROTTER-KOVO. *Domovské stránky*, [www.rotter-kovo.cz](http://www.rotter-kovo.cz) [online], cit. [2012-04-09] <[http://www.rotter-kovo.cz/fotogalerie\\_nase-produkce.html](http://www.rotter-kovo.cz/fotogalerie_nase-produkce.html)>.
- [5] ATEAM. *Domovské stránky*, [www.ateam.ic.cz](http://www.ateam.ic.cz) [online], cit. [2012-04-10] <<http://www.ateam.ic.cz/folie.pdf>>.
- [6] FERONA. *Domovské stránky*, [www.ferona.cz](http://www.ferona.cz) [online], cit. [2012-04-9] <[http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)>.
- [7] MOHYLA, M. - *Strojírenské materiály I*. Vyd. II. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0270-8.
- [8] ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ. VÚT Brno. *Domovské stránky*, <http://ime.fme.vutbr.cz/index.html> [online], cit. [2012-04-09] <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/HSR/04%20-%20Oceli%20k%20zuslechtovani%20-%20Priloha02.pdf>>.
- [9] *Qform. Uživatelská příručka*. Moskva: Quantor Ltd. 2000.
- [10] GOLOL, M. - *Návrh zápusťkového kování dveřního závěsu*, Bakalářská práce, VŠB-TU Ostrava, Katedra mechanické technologie, r. 2008, 48 s.
- [11] GOLOL, M. - *Analýza technologie tváření monobloku železničního kola*, Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, Katedra mechanické technologie, r. 2010, 73 s.

- [12] JKZ.CZ. *Domovské stránky*, [www.jkz.cz](http://www.jkz.cz) [online], cit. [2012-04-20]  
<http://jkz.cz/cs/produkty/nastrojova-ocel-19-733>
- [13] PETRUŽELKA, J. BŘEZINA, R. - *Úvod do tváření II – plošné tváření*, VŠB-TU Ostrava, r. 2001, 115 s.
- [14] KOTOUČ, J. - *Nástroje pro tváření za studena*, ČVUT Praha, r. 1978, 156 s. ISBN 80-964-78.
- [15] ZDAS. *Domovské stránky*, [www.zdas.cz](http://www.zdas.cz) [online], cit. [2012-04-22]  
<http://www.zdas.cz/content.aspx?id=16>
- [16] HRUBÝ, J. - *Metoda konečných prvků – 1. panel* [online]. [cit. 2010-04-20].  
Dostupné z URL [http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP\\_panel1.pdf](http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf).
- [17] PETRUŽELKA, J; OTČENÁŠEK, V; KLIBER, J; HRUBÝ, J. - *Metoda konečných prvků ve tváření z tepla*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 80-7078-636-1.
- [18] LEINVEBER, J; VÁVRA, P. – *Strojnické tabulky, třetí doplněné vydání*. ALBRA – pedagog. nakl., PRAHA 6, r. 2006 ISBN 80-7361-033-7, 914 s.
- [19] PETROVÁ, P – *Analýza přídatků pro broušení na ložiskových kroužcích*, Diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, Katedra obrábění a montáže, r. 2012.